الإلكترونيات العملية للمبتكرين

إعداد
الدكتور سليم ادريس



الإلكترونيات العملية للمبتكرين

■ الطبعة الأولى 2004

■ الناشر: شعاع للنشر والعلوم

حارة الرباط 2 – المنطقة 12 – حي السبيل 2

هاتف : 2643546 (21) 00963

تلفاكس : 2643545 (21) 00963

ص.ب 7875

سورية ـ حلب

لمزيد من المعلومات ولشراء كتب الدار مباشرة على الانترنت:

يرجى زيارة موقعنا: http://www.raypub.com

البريد الإلكتروني للقراء: info@raypub.com

البريد الإلكتروني لدور النشر والموزعين: raymail@raypub.com

"مَثَلُ عِلْمٍ لا يُقَالُ بِهِ، كَمَثَل كَنْزٍ لا يُنْفَقُ مِنْهُ في سَبِيلِ اللّٰهِ"

حديث شريف

مقدمة الكتاب

المبتكرون في حقل الإلكترونيات هم أشخاص يوظفون المعرفة، والأفكار الإبداعية والمعلومات الفنية المتوفرة لديهم لتحويل الأفكار إلى تجهيزات إلكترونية فعلية وعملية، ونأمل أن يقدم هذا الكتاب لكل هؤلاء المبادئ النظرية والعملية للإلكترونيات بطريقة ترفع من سويتهم الإبداعية.

ما الذي يجعل هذا الكتاب فريداً

التوازن بين المعلومات النظرية والعملية

تقدم الكثير من الكتب الإلكترونية للقارئ الكثير من المعلومات النظرية والعلاقات الرياضية قبل أن تعطيه فكرة عن العنصر الإلكتروني ووظيفته وشكله واستخدامه في التطبيقات، وإذا قدمت هذه الكتب بعض المعلومات العملية، فإن هذه المعلومات غالباً ما تكون موضوعة في نهاية الفصل وربما يكون القارئ قد أصابه التعب والملل قبل أن يصل إلى نهاية الفصل أو ربما يكون فقد الرغبة في متابعة القراءة بسبب غرقه في التفصيلات والعلاقات الرياضية الصعبة، التي لا يفهمها الكثيرون. يتجنب هذا الكتاب إغراق القارئ في مثل هذه الأمور، وقد تم تقسيم كل فصل إلى فقرات وقد قدمت المعلومات العملية للقارئ في بداية كل فصل ونقدم فيما يلي مثالاً موجزاً لفصل عن الترانزستورات الحقلية، حيث يتكون هذا الفصل من:

- مقدمة أساسية وتطبيقات نموذجيَّة وتوضح هذه المقدمة أن الترانزستور الحقلي هو عنصر الكتروني يتكون من ثلاثة أرجل، ويطبق جهد على إحدى الأرجل التي تسمى رجل التحكم، فيتم التحكم بالتيار المار بين الطرفين الآخرين للترانزستور، ويستخدم هذا الترانزستور في المضخمات وكمفتاح إلكتروني.
- أنواع الترانزستورات الحقلية (ترانزستورات قنال n وترانزستورات قنال p، وفي ترانزستورات القنال n تزداد المقاومة بين الأطراف الناقلة للترانزستور بزيادة الجهد السالب المطبق على طرف التحكم، أما في ترانزستورات القنال p فيستخدم جهد تحكم موجب.)
- آلية وكيفية عمل الترانزستورات الحقلية JFETs (وتشرح آلية العمل اعتماداً على فيزيائية العمل في المادة نصف الناقلة وبالاستعانة برسوم توضيحية).
- النماذج المائية المشابهة للترانزستورات الحقلية JFETs (ويتم هنا مقارنة عمل الترانزستور في الدارة الكهربائية مع عمل نموذج مائي يوضح كثيراً مبدأ عمل الترانزستور).
- معطيات فنيَّة (مخططات وعلاقات توضح استجابات أطراف (أقطاب) الترانزستورات الحقلية للجهود والتيارات بالإضافة إلى تعريف العديد من المصطلحات والعبارات الهامة.
- مسائل كأمثلة وتوضح هذه المسائل كيفية استخدام المعطيات والمعلومات النظرية في حل المسائل.
- دارات أساسية توضح كيفية استخدام نوعي الترانزستور الحقلي في المضخمات وفي دارات القيادة التيارية.
- اعتبارات عملية (وتتضمن أنواع ترانزستورات الـ JFET، وهي ترانزستورات الإشارات الصغيرة، وترانزستورات الترددات العالية، كما تُعطى في هذه الاعتبارات معدلات الجهد والتيار وغيرها من الأمور الهامة للترانزستور مع مواصفات لبعض النماذج وجداول الخصائص).
- تطبيقات (دارات كاملة، مازج صوتي، دارة قيادة حاكمة، مقياس شدة حقل كهربائي).

وعندما يجد القارئ المعلومات العملية في بداية الفصل فإنه يقرر بسرعة وبساطة فيما إذا كان هذا العنصر هو العنصر الذي يبحث عنه كي يستخدمه في تنفيذ فكرته أم لا، وعندها لا يكون قد أضاع وقتاً طويلاً للوصول إلى هذه النتيجة وتجنب التعب الفكري غير المبرر.

توضيح الأفكار الخاطئة

يقدم هذا الكتاب الكثير من المفاهيم الهامة في مجال الإلكترونية والتي يخطئ الكثيرون في تفسيرها كتيارات الإزاحة عبر المكثفات، وكيفية نشوء الفوتونات، ومعنى وأهمية توافق الممانعات وغيرها من الأمور التي لا تجدها في كتب الإلكترونيات الأخرى، والتي تعتبر مهمة جداً للقارئ كي يفهم الظواهر الكهربائية.

مسائل محلولة كأمثلة

تقدم الكثير من الكتب الإلكترونية مسائل وأمثلة غير عملية، أما بعضها الآخر فيعرض مسائل جيدة ومفيدة، ولكنه لا يشرح كيفية حلها وتكون هذه المسائل كمسائل امتحان أو وظائف بيتية وعلى القارئ أن يقوم بحلها لوحده وعندما يقوم بحلها قد لا يعرف فيما إذا كان حله صحيحاً أم لا، إذ لا توجد في الكثير من الكتب أجوبة للمسائل غير المحلولة، أما هذا الكتاب فلن يتركك في حيرة من أمرك فهو يعطيك الأجوبة مع الشرح المفصل لكيفية حل المسألة.

النماذج المائية المكافئة (المشابهة)

يمكن للنماذج المائية المشابهة أن تساعد على فهم أفضل وأسرع ولذلك يقدم هذا الكتاب العديد من النماذج المائية والميكانيكية المكافئة في عملها لعناصر إلكترونية وتتكون هذه النماذج من نوابض وبالونات وأبواب وغيرها من الأمور التي تبسط عليك فهم آلية عمل العنصر الإلكتروني كالترانزستور والمضخم العملياتي وغيرها.

معلومات عملية

يقدم هذا الكتاب للقارئ الأفكار والمفاهيم الدقيقة التي لا تتكلم عنها كتب الإلكترونيات التقليديَّة ففي هذا الكتاب تتعرف بالتفصيل على الفوارق بين الأنواع المختلفة للبطاريات، والمكثفات، والترانزستورات، والعوائل المنطقيَّة، كما تتعلم كيفية استخدام أجهزة القياس كالمقياس متعدد الأغراض multimeter وراسم الإشارة والمجس المنطقي. كما تتعرف في كتابنا هذا على الكثير من الأمور العملية كالدارات المتكاملة، ومن أين تشتري القطع الإلكترونية، ومن أين تحصل على المزيد من المعلومات عن موضوع معين، وكيف تتصرف عندما تعمل على الأجهزة الكهربائية كي لا تصاب بصدمة كهربائية.

بناء الدارات

يشعر القارئ المهتم بالإلكترونيات بالإحباط عندما يقرأ كتاباً لا توجدفيه دارات عملية، ويقدم هذا الكتاب نماذج عديدة من الدارات التي يمكن بناؤها مع شرح مفصل لآليات عملها، ومن هذه الدارات:

دارات مصادر التغذية، المضخمات الصوتية، دارات المكبرات الأولية، دارات التحسس بالأشعة تحت الحمراء، محركات التيار المستمر ومحركات السيرفو ودارات قيادة محركات الخطوة، ودارات قيادة الديودات المصدرة للضوء وغيرها. ويمكن

اعتماداً على هذه الدارات المجربة تحسين طريقة تفكير القارئ وتحفيزه لإيجاد طرق جديدة في تحقيق المهام المطلوبة، كما يقدم له الكتاب شرحاً عن فحص واختبار هذه الدارات.

كيفية بناء الدارات

يقدم هذا الكتاب مجموعة من التعليمات الخاصة بتصميم وبناء الدارات وذلك بالإضافة إلى توجيهات عن رسم مخططات الدارات واستخدام برامج محاكاة في التأكد من صحة عملها وكيفية توصيل العناصرمع بعضها وتلحيمها وقواعد السلامة، واستخدام ألواح التجارب والاختبار، وتصنيع الدارات المطبوعة، وتبديد الحرارة عن العناصر وتصميم العلب التي توضع الإجهزة ضمنها. كما يشرح هذا الكتاب وبالتفصيل كيفية استخدام رواسم الإشارة والمجسات المنطقية والمقياس متعدد الأغراض، وتُعطى أيضاً توجيهات عن كشف مصادر الأعطال في الدارات.

ملاحظات عن السلامة

يبيِّن الكتاب كيف ولماذا تحدث الكهرباء أضراراً لجسم الإنسان ويبيِّن لك الكتاب ما الذي يجب تجنبه، ويشرح أيضاً آلية تضرر العناصر الإلكترونية الحساسة بالشحنات الكهربائية الساكنة ويقدم اقتراحات لتجنب تعريض هذه العناصر لهذه الأخطار.

مواضيع جانبية ممتعة ومفيدة

يتضمن هذا الكتاب مواضيع جانبية ممتعة ومفيدة ضمن الفصول وفي الملحقات وتعطيك هذه المواضيع فهماً أعمق للمبادئ الفيزيائية وللتطور التاريخي للإلكترونيات، كما يقدم توجيهات عملية نادراً ما تجدها في كتب الإلكترونيات التقليدية فعلى سبيل المثال تجد فقرة كاملة عن توزيع الطاقة والتوصيلات الكهربائية المنزلية، وعن فيزيائية أنصاف النواقل، وفيزيائية الفوتونات، ومعلومات عن برامج المحاكاة الإلكترونية الحاسوبية، ومن أين يمكن طلب العناصر الإلكترونية، ويقدم لك الكتاب أيضاً شرحاً عن براءات الاختراع والقولبة الحقنيَّة والخط الزمني لتطور الإلكترونيات والمبدعين والمبتكرين في مجال الإلكترونيات.

من سيجد هذا الكتاب مفيداً

وضع هذا الكتاب للمبتكرين المبتدئين، ولا يتطلب أية معرفة مسبقة بالإلكترونيات ولذلك فإن المدرسين، والطلاب والمبتكرين المبتدئين سيجدون فيه مرجعاً ممتازاً، كما أن المتقدمين والفنيين والهواة سيجدون أن هذا الكتاب مرجع مفيد جداً.



مقدمة إلى الإلكترونيات

إن إحـــدى أكـــبر المشاكل والصعوبات التي تعترض الوافدين الجدد إلى علم الإلكترونيات هي تحديد ما الذي يجب أن يـــتعلموه، وكـــذلك تحديـــد المواضيع التي يجب عليهم دراستها وتفهمها وكذلك ترتيب هذه المواضيع من حيث أولوية الدراســـة. يبيّن الشكل (1.1) مخططاً توضيحياً للمواضيع التي يجب دراستها في مجال الإلكترونيات بشكلٍ عام، ويبيّن هذا المخطــط العناصر الإلكترونية الأساسية والتي يمكن اعتماداً عليها بناء أجهزة كهربائية والكترونية، كما يبيّن هذا الشكل المعلومات التي سوف تجدها في هذا الكتاب وفي الفقرات القادمة ستتم دراسة هذه العناصر الأساسية بالتفصيل.

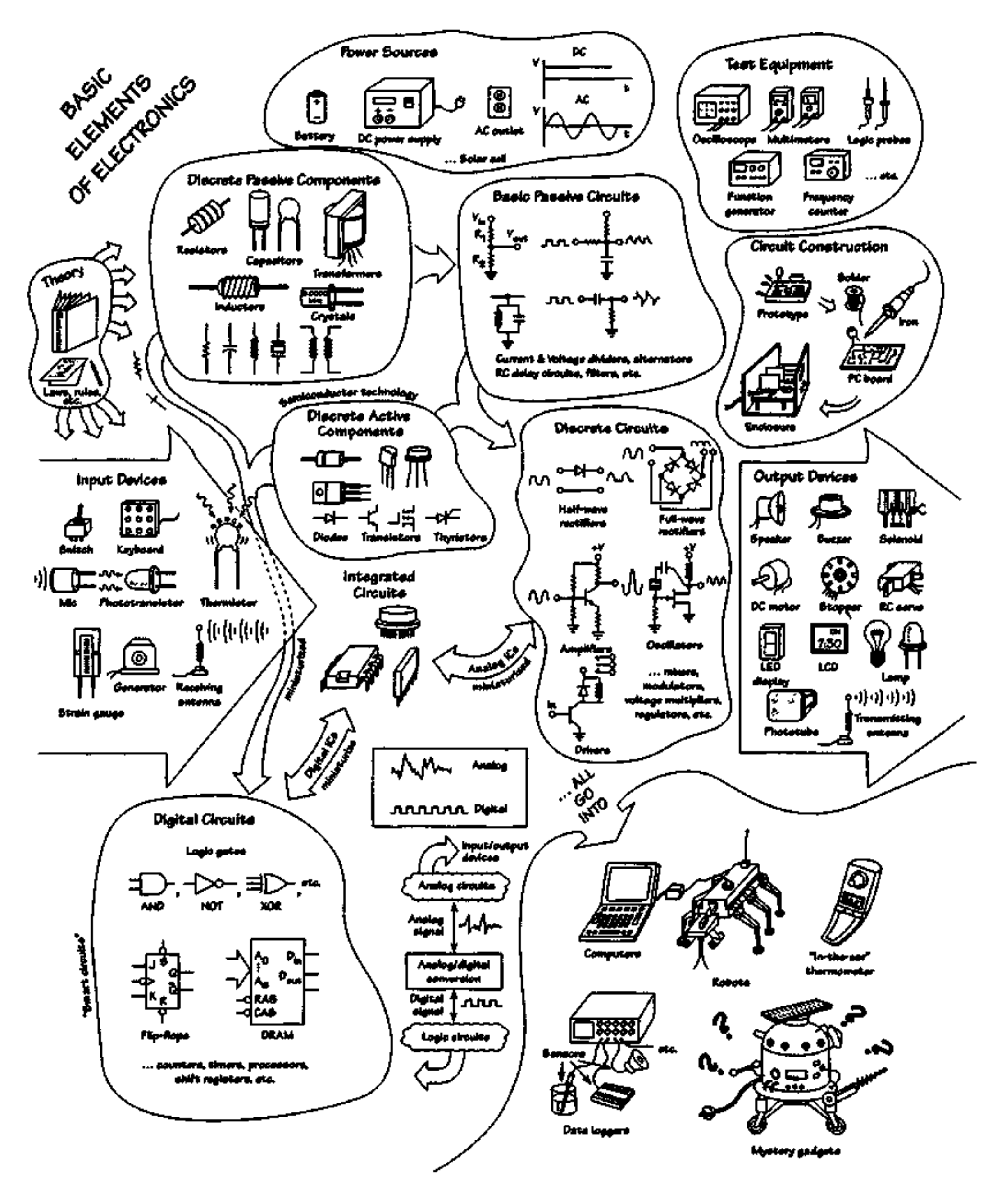
في بداية هذا المخطط تأتي الدراسة النظرية والتي تتضمن دراسة وتعلم مفاهيم الجهد (voltage) والتيار (current) والمقاومة (resistance)، والمكثف (capacitance) والتحريض والملف (inductor) والكثير من القوانين المتنوعة والنظريات التي تساعد القـــارئ علـــى التمكن من حساب جهد عقدة في دارة أو حساب تيار في فرعٍ من فروعها، ومن خلال دراسة المبادئ النظرية يتعلم القارئ ما يحتاجه عن العناصر الكهربائية غير الفعالة والتي تسمى أيضاً عناصر سلبية (passive elements)، كالمقاومات والمكثفات والملفات والمحولات (transformers).

بعد دراسة المبادئ النظرية، والعناصر الإلكترونية (الكهربائية) غيرِ الفعالة ووفق هذا المخطط يجب أن يتعرف القارئ على الـــدارات المكـــونة من عناصر سلبيّة وتتضمن هذه الدارات كلاً من دارات تحديد التيار (Current limiting networks)، ومقســـمات الجهد (voltage dividers)، ودارات المرشحات (filters) وكذلك دارات المخمدات (attenuators) وغيرها، وقد تبدو الدارات البسيطة في بداية دراستك لها قليلة الفائدة ولكن فائدتها وأهميتهاستتوضح عندما تستخدم هذه الدارة في تكوين دارة أو دارات أعقد ذات فوائد ملموسة.

بعد دراسة العناصر غير الفعالة (السلبيّة) ينتقل القارئ إلى دراسة العناصر الإلكترونية الفعالة (active devices) والتي تصنع مـــن أنصـــاف النواقل كالديودات (diodes) التي تسمح بمرور التيار في اتجاه واحد، والترانزستورات (transistors) التي تستخدمٍ في التضخيم وكذلك كمفاتيح إلكترونية، والثايرستورات (thyristors) والتي تسمى أيضاً مفاتيح يتم التحكم بها كهربائياً. بعد دراسة كل الأمور المذكورة سابقاً يمكنك الانتقال إلى دراسة الدارات التي تحوي عناصر فعالة وعناصر سلبيّة كدارات المقومات (rectifiers) التي تحول الجهد المتناوب (ac) إلى جهد مستمر (dc) والمضخمات (amplifiers)، والهزازات (oscillators)، والمعدلات (modulators) والموازج (mixers)، ومنظمات الجهد (voltage regulators) وعندها تشعر بفائدة وجاذبية وأهمية الدارات والمواضيع التي تدرسها.

قامـــت الشركات الصانعة بإنتاج ما يُسمى بالدارات المتكاملة (integrated circuits) والتي يُشار إليها إختصاراً بـــ (ICs) من أجل تسهيل عمليات التصميم، وتحوي الدارة المتكاملة بداخلها على عناصر إلكترونية مختلفة تُصنع بطرِيقة تكنولوجية خاصة علـــىٰ شريحة أساس واحدة من السيلكون. وتوضع الدارة المتكاملة بعد الانتهاء من تشكيل عناصرها الإلكترونية (في المصنع)

ضمن غلاف من البلاستيك أو السيراميك وتوصل أطرف العناصر الإلكترونية اللازمة إلى العالم الخارجي بواسطة أرجل ناقلة تظهـــر مـــن الغـــلاف. تصـــنف الـــدارات المتكاملة حسب طبيعة الإشارات التي تتعامل معها إلى دارات تكاملية تشابهية (analog ICs) كالمضخمات والمنظمات (منظمات الجهد) وهذه الدارات تتعامل مع إشارات ذات استمرارية زمنية، وكذلك إلى دارات تكاملـــية رقمـــية (digital ICs) وهذه الدارات تتعامل مع مستويات محدَّدة من الجهود (مستويين) يسمى أحدهما مســـتوى الصـــفر مـــنطق "0" أو مستوى "L" والآخر مستوى "1" منطق أو مستوى "H". من الضروري هذه الأيام لكل مصمم إلكتروني أن يتعرف على الدارات التكاملية وأن يتفهم مبادئ عملها واستخداماتها في التصميم الإلكتروني.



الشكل (1.1)

إذن تـــتعامل الدارات التكاملية الرقمية مع مستويين من الجهود، مستوى الواحد منطق "1" أو "H" والذي يساوي (5 V) في عائلـــة TTL مـــثلاً ومســـتوى الصفر منطق "0" أو "L" والذي يبلغ حتى (0.4 V) في عائلة TTL، والغاية من تحديد مســـتويات الجهـــود في الدارات التكاملية الرقمية هي تبسيط عمليات معالجة وتخزين المعلومات (كالأرقام numbers)، والرموز (Symbols) ومعلومات التحكم (Control informations).

يـــتم في عملية ترميز المعلومات تحويل المعلومات إلى تشكيلة من الواحدات والأصفار وتسمى التشكيلة المكونة من ثمانية خانـــات باســـم كلمة (word) وبالطبع فإن الدارات المتكاملة الرقمية قادرة على التعامل مع هذه الكلمات وطبعاً يقوم المصـــمم بـــتحديد معاني هذه الكلمات في دارة معينة. تتعامل الدارات المتكاملة الرقمية (بعكس الدارات التشابهية) مع مجموعة جديدة من المكونات والعناصر، والتي تكون تقريباً كلها متكاملة (أي موجودة في دارات متكاملة) وتستخدم في هـــذه الأيام أعداد هائلة من الدارات المتكاملة الخاصة في مجال الإلكترونيات الرقمية (digital electronics). وبعض هذه الـــدارات مصـــمم لإنجـــاز عملـــيات منطقية (logical operations) على معلومات الدخل، وبعضها الآخر مصمم للعد (Counting) والآخـــر للتخـــزين (Storage) حيث تستعاد المعطيات أو المعلومات منها لاحقاً. تتضمن الدارات التكاملية الـــرقمية كلاً من البوابات المنطقية logic gates، والقلابات (flip-flops)، والعدادات (counters)، والذواكر (memories) والمعالجـــات (processors) وغيرهـــا. وتعتـــبر الدارات المتكاملة الرقمية المستخدمة في جهاز إلكتروني بمثابة العقل لذلك الجهـــاز. كي تتعامل الدارات التكاملية الرقمية مع الإشارات التشابهية (analog signals)، لابد من تحويل هذه الإشارات التشـــابهية إلى واحـــدات وأصـــفار ويـــتم ذلـــك بواســـطة دارات تـــبديل تســـمى مـــبدلات تشـــابهية رقمـــية (Analog to digital converters) ويُرمز لها اختصاراً بـــ (A/D)، وكذلك تستخدم دارات مبدلات الإشارات الرقمية إلى تشابهية (digital to analog converters) (D/A) لتحويل الإشارات أو الكلمات الرقمية إلى إشارات تشابهية.

ستتعلم خلال دراستك للإلكترونيات شيئاً عن الحساسات التي تقوم بتحويل إشارات فيزيائية كالصوت (Sound) والضوء (light) والضـــغط (pressure)، وغيرهـــا إلى إشـــارات كهـــربائية تستطيع الدارات الإلكترونية التعامل معها ومن هذه الحساسات الميكروفونات (microphones) والترانزستورات الضوئية (phototransistors)، والمفاتيح (switches) والمقاومات الحرارية (thermistors) وحساسات الإجهاد، كما ستتعرف على المولدات (generators) والهوائيات. تُسمي بعض المراجع الحســـات المذكـــورة ســـابقاً باســـم أجهزة الدخل Input devices، وهناك أيضاً بعض العناصر التي تحول الإشارات الكهـــربائية إلى إشارات فيزيائية وتسمى هذه العناصر باسم عناصر خرج (output devices) ومن هذه العناصر المصابيح (Lamps) والديـــودات المصـــدرة للضوء (LEDs). ووحدات الإظهار LCD والسماعات (المجهرات speakers) والطنانات (buzzers) والمحـــركات (motors)، ومنها محركات التيار المستمر ومحركات الخطوة ومحركات السيرفو (servo motors)، والملفـــات (solenoids)، والهوائـــيات. إن عناصـــر الدخل والخرج devices (I/O) هي التي تسمح للإنسان بالتواصل مع الدارات الإلكترونية وبالعكس. بعد أن تكون قد تعلمت كل ما ذكر تأتي مرحلة اختبار التركيب (أي اختبار الدارة التي تم تـــركيبها) وتـــتطلب هـــذه المرحلة معرفة قراءة مخططات الدارات، وكذلك استخدام أجهزة القياس كالمقياس متعدد الأغراض والذي يسمى أيضاً آفومتر، ورواسم الإشارة والمجسات المنطقية (Logic probes). ولابد لمن يطمح للوصول إلى مستوىً جيد في بناء الدارات من أن يتعلم كيفية تصنيع الدارات المطبوعة وتلحيم العناصر عليها أو تجميع العناصر المكونة لدارة ما على لوحة اختبار وتوصيلها وتغذيتها كي يتمكن بعد ذلك من اختبارها.


https://maktbah.net

2



المبادئ النظرية

يتناول هذا الفصل المفاهيم (Concepts) الأساسية للإلكترونيات كالتيار، والجهد، والمقاومة والاستطاعة الكهربائية (electrical power)، والمكثف والملف وبعد ذلك يشرح هذا الفصل رياضياً كيفية إيجاد الجهد على عنصر وكذلك التيار الذي يمر فيه وكمثال على ذلك ستدرس الجهود على المقاومة والملف والمكثف وكذلك تيارات هذه العناصر، يُقدم هذا الفصل دراسة لتحليل الدارات العقدية (complex networks) باستخدام بعض القوانين والنظريات الأساسية كقانون أوم (Ohm's law) وقوانين كيرشوف (Kirchoff's laws) ونظرية ثيفينن. تُدرس في هذا الفصل الدارات العقدية التي تحوي مقاومة، ومكثف، وملف عند تطبيق جهد كهربائي عليها. تقسم مصادر القدرة التي تطبق على الدارات الكهربائية والإلكترونية إلى مصادر مستمرة (dc) ومصادر متناوبة (ac) والمصادر المتناوبة يمكن أن تكون دوريّة جيبيّة، ودورية لا جيبيّة (non sinusoidal periodic)، وكذلك مصادر لا دورية ولا جيبيّة (nonsinusoidal non periodic). في نهاية هذا الفصل تُدرس الأمور اللازمة لتحليل الدارات التي تحوي عناصر غير خطية (مثل الديودات، والترانزستورات، والدارات المتكاملة).

من الواجب هنا أن نلفت انتباه القارئ إلى ضرورة عدم القلق عندما يجد أن بعض المعالجات الرياضية للأمور صعبة الفهم بالنسبة له، لأنه وكما سيجد لاحقاً، فإن العلاقات الرياضية الواردة تستخدم إما لبرهان علاقة أو قانون أو نظرية أو لتبيِّن لك كيف ستسير الأمور فيما لو لم تستخدم تلك العلاقات، وفي واقع الأمر فإن مقدار المعرفة الرياضية التي تلزمك لتعرف كيفية تصميم الدارات ليست كبيرة وستجد أن التمكن من بعض أسس الجبر (algebra) هو كل ما يلزمك. عندما تجد في بعض الفقرات أن الدراسة الرياضية صعبة عليك تجاوز هذه الدراسة حتى تصل إلى العلاقات التصميمية المفيدة، وغالباً ما تكون تلك العلاقات بسيطة ولا صعوبة في فهمها واستيعابها.

1.2 التيار

يُرمز للتيار في الدارات الكهربائية بالرمز (I) وهو يعبِّر عن كمية الشحنة (ΔQ) أو (dQ) التي تعبر المقطع العرضي للناقل في واحدة الزمن ولذلك فإن علاقة التيار يُعبَّر عنها بالمعادلة التالية:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}$$

تسمى واحدة التيار (أمبير، ampere) ويُرمز لها اختصاراً بالرمز amp أو A والرمز المختصر (A) كواحدة كقياس التيار هو الرمز المتداول والأمبير الواحد يساوي كولومب واحد (Coulomb) في الثانية.

$$1\ A = 1\ C/S$$

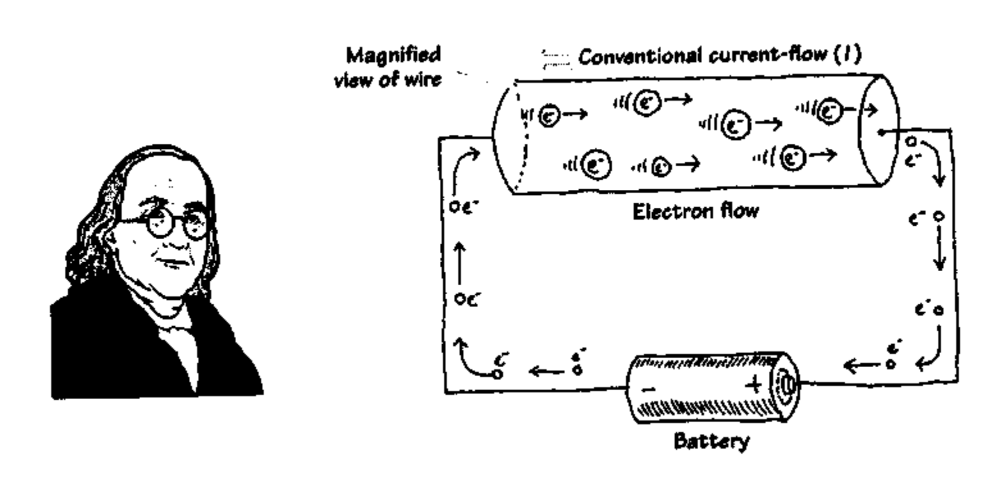
تحمل التيارات الكهربائية عادة بواسطة الإلكترونيات، وكل إلكترون يحمل شحنة مقدارها (-e) وهذه الشحنة تساوي

$$-e = -1.6 \times 10^{-19}\ C$$

شحنات بنيامين فرانكلين الموجبة

سنتكلم الآن عن اتجاه جريان التيار الكهربائي، وهنا قد تجد بعض التعارض في الأفكار إذا لم تفهم الاصطلاح الذي وضعه بنيامين فرانكلين Benjamin Franklin والذي يُعتبر أباً لعلم الكهرباء. في أي وقت وعندما يقول لك أحد ما أن تياراً قدره (I) يتدفق من النقطة (A) إلى النقطة (B)، فإنك سوف تعتبر وبدون أي شك اعتماداً على ما علمناك إياه عن التيار، بأن الإلكترونات تتدفق من النقطة (A) إلى النقطة (B)، وذلك لأن الإلكترونات هي الأجسام التي تتحرك وتحمل التيار الكهربائي. قد يكون هذا التصور بديهيّاً بالنسبة لك، ولكن في واقع الأمر فإن الاتجاه الاصطلاحي لجهة التيار (جهة جريان التيار) هو اتجاه حركة الشحنات الموجبة، وهذا الاتجاه هو المعتمد عالمياً، أي أن حوامل الشحنات الموجبة هي التي تتحرك من (A) إلى (B) وجهة حركة الإلكترونات هي في الواقع عكس جهة التيار.

ما الذي يجري؟ ولماذا نفترض مثل هذه الفرضيات؟ نقول أن الإلكترونات ذات الشحنات السالبة هي التي تحمل التيار ثم نقول أن اتجاه التيار بعكس جهة حركة هذه الإلكترونات أو بجهة حوامل الشحنات الموجبة! والجواب على ذلك هو مجرّد اصطلاح يعود إلى بنيامين فرانكلين والذي اعتبر أن الأشياء الغامضة (في وقته) والتي تتحرك وتؤدي عملاً هي حوامل الشحنات الموجبة. بعد بنيامين فرانكلين بزمن جاء فيزيائي آخر اسمه جوزيف طومسون Joseph Thomson وأجرى تجربة استطاع فيها عزل الشحنات المتحركة الغامضة (أيام فرانكلين)، ولكن كي يتمكن جوزيف طومسون من إجراء قياسات ومن تسجيل نتائج في تجربته، وكذلك من أجل إجراء الحسابات كان بمقدوره الاعتماد على القوانين المتوفرة لديه وتلك القوانين كانت قد صيغت اعتماداً على تيارات فرانكلين الموجبة، ولكن الشحنات المتحركة التي وجدها طومسون (والتي سماها إلكترونات electrons) كانت تتحرك بعكس الجهة الاصطلاحية للتيار I الذي استخدمه في معادلاته، أي أن الإلكترونات تتحرك في الواقع بعكس الجهة اللاصطلاحية التي وضعها فرانكلين. يبيِّن الشكل (1.2) دارة بسيطة مكونة من بطارية وناقل تم تكبير جزء منه لتوضيح حركة الإلكترونات ضمن الناقل وعلى الشكل يظهر الاتجاه الاصطلاحي للتيار واتجاه حركة الإلكترونات.



الشكل 1.2

حسناً ماذا يعني كل هذا الكلام لنا؟ بالنسبة للذين لا يهتمون كثيراً بالتفاصيل الفيزيائية لا يعني هذا الكثير، وأعني بذلك أنه يمكننا افتراض وجود شحنات موجبة تتحرك عبر الأسلاك والعناصر الكهربائية وينتهي الأمر، وفي الواقع فإن كافة القوانين المستخدمة في الكهرباء والإلكترونيات كقانون أوم ($V = I.R$) تعتبر أن التيار (I) مكون من حوامل موجبة للشحنة وسوف نعتمد هذا الاصطلاح وهذا العرف لجهة التيار، وعليك دوماً ألا تنسى أن جهة حركة الإلكترونات هي عكس جهة التيار.

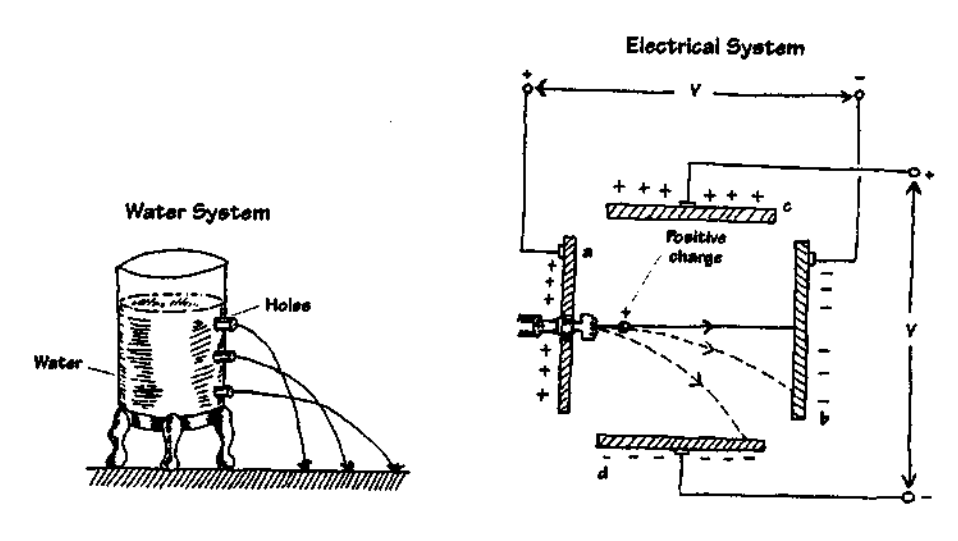
2.2 الجهد

عندما تفصل مسافة بين شحنتين يكون هناك قوة كهربائية بينهما. إذا كانت الشحنتان متماثلتين (موجبتين أو سالبتين) تكون القوة قوة تدافع، أما إذا كانت الشحنتان متعاكستين فإن القوة ستكون قوة تجاذب. إذا اعتبرنا أن هناك شحنتين مثبتين في نقطتين وتم وضع واحدة شحنات موجبة في مجال هاتين الشحنتين فإن واحدة الشحنات الموجبة سوف تتأثر بالشحنتين الثابتتين وسوف تتحرك واحدة الشحنات الموجبة باتجاه الشحنة الثابتة الأكثر سلبيّةً أي أنها تُجذب من الجسم ذي الشحنة الأكثر سلبية وتدفع عن الجسم ذي الشحنة الأكثر إيجابية.

يستخدم مصطلح الحقل الكهربائي (electrical field) للتعبير عن قيمة واتجاه القوة المؤثرة على واحدة الشحنات الموجبة الواقعة في مجال الشحنات الثابتة. وعندما تتحرك واحدة الشحنات الموجبة من نقطة إلى أخرى ضمن مجال (والذي نسميه حقل) الشحنات السالبة فإن طاقتها الكامنة تتغيّر وهذا التغيُّر في الطاقة الكامنة لواحدة الشحنات الموجبة يكافئ العمل الذي تؤديه بحركتها عند انتقالها مسافةً معينة. إذا قَسمنا الطاقة الكامنة على واحدة الشحنات الموجبة نحصل على ما يسمى الجهد (voltage) أو الكمون الكهربائي (electrical potential) ولا يجب أن نخلط بين الجهد الكهربائي والقدرة الكهربائية الكامنة electrical potential energy، وغالباً ما يستخدم مصطلح الكمون potential أو القوة المحركة الكهربائية (electromotive force (emf بدلاً من مصطلح الجهد voltage. يُعرَّف الجهد (voltage) والذي يُرمز له بالرمز (V) بأنه مقدار القدرة اللازمة لنقل واحدة الشحنات من مكان إلى آخر (الطاقة الكامنة مقسومة على واحدة الشحنات) واحدة الجهد هي الفولت ويُرمز له اختصاراً بالرمز (V) أي نفسُ رمز الجهد، وبناءً على ذلك يمكن أن تلاحظ أن:

$$1\ V = 1\ J/C$$

وفي المصطلحات الإلكترونية من المفيد أن نعتبر أن الجهد هو نوع من الضغط الكهربائي (electrical pressure) المشابه لضغط الماء ويبيِّن الشكل 2.2 مقارنةً بين خزان مملوء بالماء ومجموعتين من الصفائح المتوازية المشحونة.



الشكل 2.2

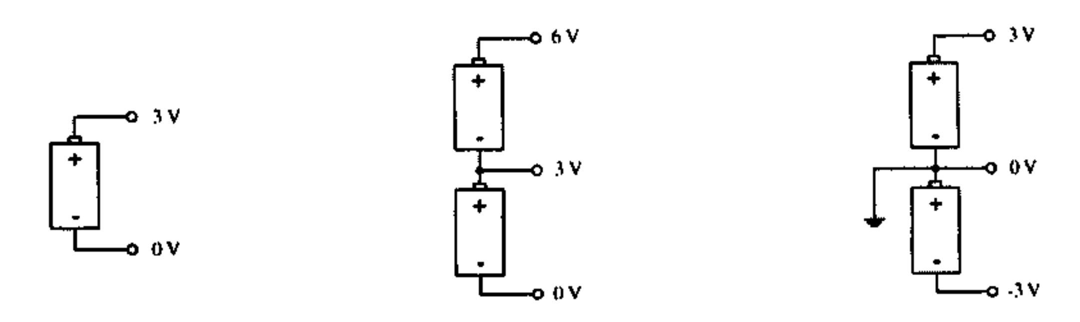
في خزان الماء يكون ضغط الماء أعظم ما يمكن في قاع الخزان بسبب وزن الماء وإذا تم ثقب الخزان في أماكن مختلفة من جداره فإن الماء سوف يندفع متسرباً من الخزان بسبب ضغط الماء داخل الخزان ويكون مقدار اندفاع الماء مبتعداً عن الخزان أكبر كلما كان الثقب أقرب إلى القاع (انظر الشكل) وطبعاً ينحني الماء المتدفق من الخزان باتجاه الأرض بسبب جاذبية الأرض. الآن نعتبر أن الماء مشابه لمصدر جسيمات ذات شحنة موجبة ونعتبر أن ضغط الماء مشابه للجهد بين الصفيحتين في النظام الكهربائي. الشحنات الموجبة سوف تبتعد عن الصفيحة الموجبة (a) وتتجه إلى الصفيحة السالبة (b)

أي أن الشحنات الموجبة تتحرر من الجهد الأعلى إلى الجهد الأخفض (مثل الماء الذي يتسرب من الخزان). عندما تتحرك الشحنة الموجبة من (a) إلى (b) فإن الجهد بين الصفائح (c) و(d) سوف يؤدي إلى انحراف حزمة الشحنات الموجبة إلى الصفيحة (d) ومرة ثانية نقول إن الشحنات الموجبة تنتقل إلى الجهد الأخفض (بشكلٍ مشابه لحزمة الماء الخارجة من الثقب والتي تنحني بسبب الجاذبيَّة)، كلما كان الجهد بين (a) و(b) أكبر كان انحناء حزمة الجسيمات الموجبة أقل باتجاه (d)، وبذلك يصبح فهم الجهد لعبة نسبيّة، فإذا قلنا إن جهد نقطة في دارة يساوي (10 V)، فإن هذا لن يكون له معنى إلا إذا كانت هناك نقطة أخرى في الدارة يقارن الجهد المذكور معها، وعادة يتم اعتبار الأرض بقدرتها اللا محدودة على امتصاص الشحنات والتي تعتبر شحنتها صفراً هي نقطة المقارنة ويعتبر جهد الأرض مساوياً للصفر ويبيِّن الشكل (3.2) الرمز المعتمد للأرضي في الدارات الكهربائية.



الشكل 3.2

في بعض الحالات تحدَّد جهود في الدارة دون أن تكون مأخوذة بالنسبة إلى الأرض ففي الشكل (4.2) وفي البطاريات اليسارية يُحدَّد جهد أحد أقطاب البطارية بالنسبة للقطب الآخر أما في الشكل اليميني فتستخدم الأرض كنقطة مرجعية للجهود.



الشكل 4.2: بعض البطاريات

3.2 المقاومة

يستخدم تعبير المقاومة للدلالة على انخفاض تدفق التيار، وبالطبع فإن لكافة النواقل مقاومة ذاتية وهذه المقاومة الذاتية تعود لعدة أسباب منها طبيعة الناقلية الإلكترونية للمادة التي صنع الناقل منها، ودرجة الحرارة الخارجية والشوائب التي تدخل في تركيب مادة الناقل، وغيرها، وفي الإلكترونيات تصنع العناصر التي تسمى مقاومات لمقاومة التيار ويبيِّن الشكل (5.2) الرمز المعتمد للمقاومة.



الشكل 5.2: رمز المقاومة.

إذا تم تطبيق جهد بين طرفي مقاومة يمر فيها تيار يتناسب طرداً مع الجهد المطبق وتُدعى العلاقة بين الجهد والتيار في المقاومة باسم قانون أوم (Ohm's law) وهي:

$$V = I.R$$

R تسمى المقاومة وواحدها هي فولت على الأمبير أو الأوم ويُرمز لواحدة المقاومة بالرمز (Ω) وبذلك فإن:

$$1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

القدرة الكهربائية

يتم تحوُّل بعض الطاقة الحركية للإلكترونات التي تعبر المقاومة إلى طاقة حرارية (بسبب اهتزاز الذرات الشبكية/أو الأيونات في المقاومة) والاستطاعة التي تضيع على هذه التصادمات تساوي التيار ضرب الجهد، وبتعويض قانون أوم في معادلة الاستطاعة يتم الحصول على العلاقات التالية للاستطاعة:

$$P = I.V = I.(I.R) = I^2R$$
$$= \frac{V}{R}.V = \frac{V^2}{R}$$

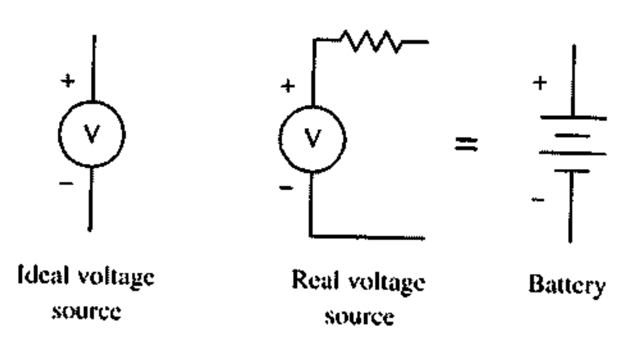
4.2 مصادر الاستطاعة المستمرة

تؤمن مصادر الاستطاعة الجهد والتيار اللازمين لتشغيل الدارات. وتصنف مصادر الاستطاعة نظرياً إلى مصادر جهد مثالية (ideal voltage sources) ومصادر تيار مثالية (ideal current sources). ومصدر الجهد المثالي هو عبارة عن أداة (عنصر) أو جهاز يؤمن جهداً ثابتاً بين طرفين، وإذا تم وصل مقاومة حمل متغيرة بين طرفي مصدر الجهد المثالي فإن جهد المصدر يبقى ثابتاً حتى لو تغيرت مقاومة الحمل، وهذا يعني أن التيار يتغير بتغير المقاومة أما الجهد فيبقى ثابتاً.

$$I = \frac{V}{R}$$

R تتغيّر، فيتغيَّر التيار ويبقى V ثابتاً.

وعندما تصبح المقاومة (R = 0) فإن التيار سيصبح مساوياً اللا نهاية، وفي الواقع لا يوجد مصدر جهد يُعطي تياراً لا نهائياً، ولذلك يتم تعريف مصدر الجهد الفعلي (real voltage source) كالبطارية مثلاً، والتي تستطيع تأمين قدر محدد من التيار ويرمز لمصدر الجهد الفعلي برمز مصدر الجهد المثالي مع مقاومة صغيرة على التسلسل، كما في الشكل (6.2).

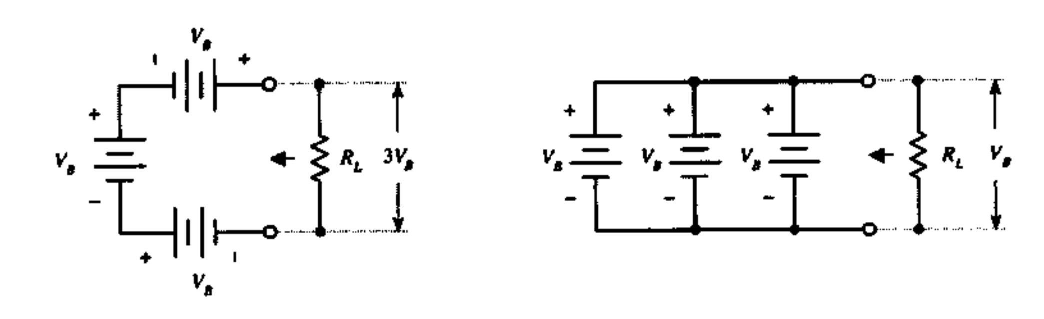


الشكل 6.2

أما مصدر التيار المثالي فهو جهاز (أداة) يعطي تياراً ثابتاً لحمل خارجي بغض النظر عن مقاومة ذلك الحمل أو عن الجهد المطبق، ويجب أن يكون مصدر التيار المثالي قادراً على توفير (تأمين) أي جهد ضروري بين طرفيه. إن مصادر التيار الفعلية (real current sources) تتصف بمحدودية الجهد الذي يمكن أن تؤمنه ولا تعطي في الواقع تياراً ثابتاً في الخرج، ولا تتوفر أدوات (أجهزة) بسيطة يمكن اعتبارها مصدراً مثالياً للتيار.

5.2 البطاريات كمصادر جهد بسيطة

تعطي البطاريات المبينة في الشكل (7.2) نفس الاستطاعة إلى الحمل الموصول بين طرفيها، ويعطي الشكل اليساري جهداً يساوي ثلاثة أضعاف جهد البطارية الواحدة وهذا الجهد يُطبق على طرفي الحمل، أما الشكل اليميني فيعطي إلى الحمل تياراً (عند الضرورة) يساوي ثلاثة أضعاف تيار البطارية الواحدة أما الجهد بين طرفيه فيساوي جهد بطارية واحدة، ودوماً يتعلق تيار الحمل بقيمة مقاومة الحمل.



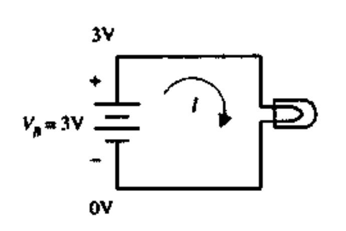
الشكل 7.2

6.2 الدارات الكهربائية

تتكون الدارة الكهربائية من تركيبة من الأسلاك (wires)، والمقاومات والعناصر الكهربائية الأخرى التي تسمح بمرور التيار الكهربائي وعادةً تتكون الدارة الكهربائية من مصدر جهد (voltage source) وعدد من العناصر الكهربائية الموصولة مع بعض بواسطة الأسلاك وتصنف الدارات الكهربائية إلى دارات تسلسلية (series circuits)، ودارات تفرعية (parallel circuits) ودارات مختلطة تسلسلية وتفرعية.

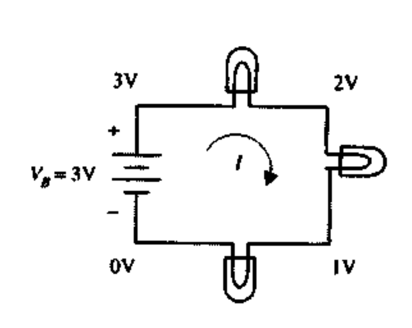
دارة أساسية

في الدارة العلوية من الشكل (8.2) يستخدم مصباح كهربائي بسيط كحمل (والحمل هو العنصر من الدارة الذي يصرف عليه عمل لتحريك التيار عبره). وبوصل المصباح إلى البطارية يمر تيار من القطب الموجب للبطارية عبر المصباح إلى القطب السالب ويغذي هذا التيار فتائل (filament) المصباح ويتم إصدار ضوء من المصباح. اتجاه التيار في هذه الدارة هو الاتجاه الاصطلاحي، أما جهة حركة الإلكترونات فهي عكس جهة التيار.



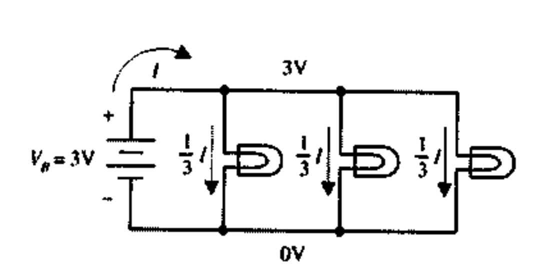
الشكل 8.2

دارة تسلسلية



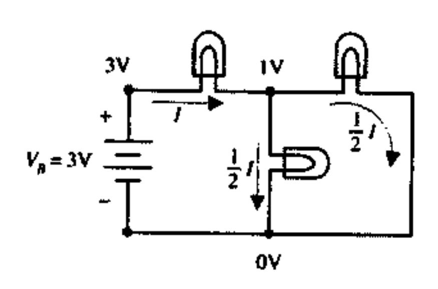
يتم تشكيل دارة تسلسلية بوصل مصابيح واحداً بعد الآخر كما في الشكل المبيَّن في (8.2) وفي هذه الدارة يمر نفس التيار عبر المصابيح وينخفض الجهد بمقدار الثلث عند مرور التيار عبر أحد المصابيح وبذلك يكون فرق الجهد بين طرفي كل مصباح مساوياً (1) واحد فولت وبالمقارنة مع الدارة الأساسيّة يكون الجهد بين طرفي كل صباح مساوياً ثلث الجهد المطبق بين طرفي مصباح الدارة الأساسية، ومقاومة الحمل الفعلية لهذه المصابيح تساوي ثلاثة أضعاف مقاومة حمل الدارة الأساسية وذلك بفرض أن مقاومات كافة المصابيح في الدارتين متساوية.

دارة تفرعية



في الدارة التفرعيَّة توصل الأحمال إلى الدارة بحيث يكون الجهد المطبق بين أطرافها متساوياً وفي الدارة الثانية من الأسفل في الشكل (8.2) إذا كانت مقاومات المصابيح متساوية فإن تيار البطارية يتفرع إلى ثلاثة تيارات متساوية يمر كل واحد منها عبر أحد المصابيح، وفي هذه الدارة تكون إضاءة المصابيح أقوى من إضاءة المصابيح الثلاثة الموجودة في الدارة التسلسلية. ولكن هنا يستهلك تيارٌ من البطارية يساوي ثلاثة أضعاف التيار المستهلك من بطارية الدارة التسلسلية ومقاومة الحمل الكلية للدارة تساوي هنا (في الدارة التفرعية) ثلث مقاومة أحد المصابيح.

دارة مختلطة تسلسلية-تفرعية



تابع الشكل 8.2

في الدارة السفلية من الشكل (8.2) توصل مع البطارية أحمال بشكل مختلط تسلسلي — وتفرعي، وفي هذه الدارة نلاحظ انخفاض الجهد بعد المصباح اليساري الأول الموصول طرفه اليساري مع موجب البطارية إلى (1 V).

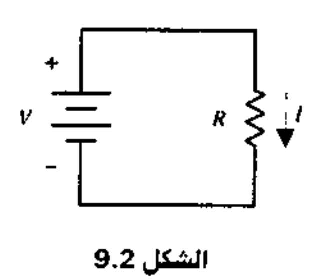
وكذلك يتفرع التيار (I) المار عبر المصباح الأول ليمر في المصباحين اليمينيين ويمر في كل مصباح تيار يساوي ($\frac{1}{2}I$)، بفرض أن مقاومة المصباحين متساوية. مقاومة الحمل الكلية للدارة المختلطة تساوي ($\frac{3}{2}$) من مقاومة المصباح الواحد.

تحليل الدارة

نتعرف فيما يلي على بعض القوانين الهامة والنظريات والطرق المستخدمة لتحديد التيارات والجهود في دارة مكونة من مقاومات أومية صرفة ومغذاة من مصدر جهد مستمر (dc) كبطارية مثلاً.

7.2 قانون أوم

ينص قانون أوم على أن تطبيق جهد قدره (V) بين طرفي مقاومة (R) يؤدي إلى مرور تيار (I) عبر المقاومة والتيار $\left(I=\frac{V}{R}\right)$ وبذلك إذا كان (V) معلوماً و(R) معلومة يمكن حساب التيار (I)، وإذا كانت (R) معلومة والتيار الذي يمر فيها (I) معلوماً يمكن معرفة الجهد بين طرفيها من العلاقة (V = I.R)، وأخيراً إذا كان (V) معلوماً و(I) معلوماً يمكن حساب المقاومة (R) من العلاقة $\left(R=\frac{V}{I}\right)$، انظر الشكل (9.2).



الشكل 9.2

8.2 اختزال الدارة

في الدارات التي تحوي عدة مقاومات يمكن عادة اختزال الدارة إلى شكل أبسط بالنظر إلى فروع الدارة وتحديد المقاومات الموصولة على التسلسل والمقاومات الموصولة على التفرع (التوازي)، فالمقاومات الموصولة على التسلسل تستبدل بمقاومة مكافئة واحدة وكذلك المقاومات الموصولة على التفرع تستبدل بمقاومة مكافئة واحدة، ونبيِّن فيما يلي كيفية اختزال الدارات.

المقاومات الموصولة على التسلسل

إذا وُصلت مقاومتان (R_1) و(R_2) على التسلسل فإن هبوط الجهد على المقاومة الأولى سيكون (V_1) وعلى المقاومة (R_2) سيكون (V_2) ومجموع الجهود على هذه المقاومات يساوي الجهد الكلي المطبق:

$$V_{in} = V_1 + V_2$$

وبما أن التيار (I) نفسه يمر عبر المقاومتين يمكن استخدام ($I.R_1$) بدلاً من (V_1) ويمكن استبدال (V_2) بالمقدار ($I.R_2$) حسب قانون أوم:

$$V_{in} = I.R_1 + I.R_2 = I\,(R_1 + R_2) = I.R_{eq}$$

$$R_1 + R_2 = R_{eq}$$

تسمى R_{eq} بالمقاومة المكافئة للمقاومتين الموصولتين على التسلسل وهي تساوي مجموع المقاومتين، ولحساب التيار I نكتب العلاقة:

$$V_{in} = I.R_{eq} \Rightarrow I = \frac{V}{R_{eq}}$$

من أجل حساب الجهد الهابط على كل مقاومة في الشكل (10.2) يتم تطبيق قانون أوم كما يلي:

$$V_1 = I.R_1 = \frac{V_{in}}{R_{eq}} R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{in}$$

$$V_2 = I.R_2 = \frac{V_{in}}{R_{eq}} R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in}$$

تسمى العلاقات الأخيرة باسم معادلات مقسمات الجهد، وهي علاقات هامة يجب على القارئ معرفتها، وسوف يواجهها القارئ كثيراً. إذا كان عدد المقاومات التسلسلية أكثر من مقاومتين فإن المقاومة المكافئة ستكون

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots\dots\dots\dots + R_n$$

المقاومات الموصولة على التفرع-Resistors in Parallel

عند وصل مقاومتين R_1 وR_2 على التفرع فإن التيار (I_{in}) يتفرع إلى المقاومتين ويكون:

$$I_{in} = I_1 + I_2$$

I_1: هو تيار المقاومة R_1

I_2: تيار المقاومة R_2

بما أن الجهد المطبق على المقاومتين هو نفسه (V_{in}) وحسب قانون أوم

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R_1}; I_2 = \frac{V_{in}}{R_2}$$

نستبدل I_1 بـ $\frac{V_{in}}{R_1}$ وI_2 بـ $\frac{V_{in}}{R_2}$ وبذلك نجد أن:

$$I = \frac{V_{in}}{R_1} + \frac{V_{in}}{R_2} = V_{in}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

والمقاومة المكافئة لهاتين المقاومتين الموصولتين على التوازي هي:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow R_{eq} = \frac{R_1.R_2}{R_1 + R_2}$$

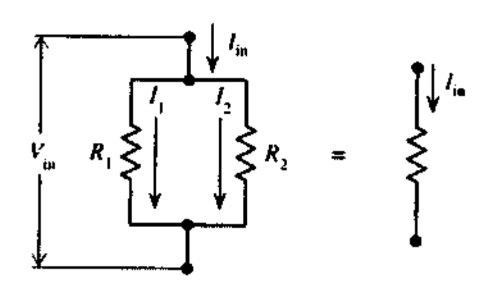
ولحساب التيار الذي يمر في كل مقاومة نطبق قانون أوم

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R_1} = \frac{I_{in}.R_{eq}}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_{in}$$

$$I_2 = \frac{V_{in}}{R_2} = \frac{I_{in}.R_{eq}}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_{in}$$

تسمى هذه العلاقات باسم علاقات مقسم التيار. وهي علاقات هامة جداً. المقاومة المكافئة لعدد من المقاومات الموصولة على التفرع تُعطى بالعلاقة التالية:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots\dots\dots\dots + \frac{1}{R_n}$$



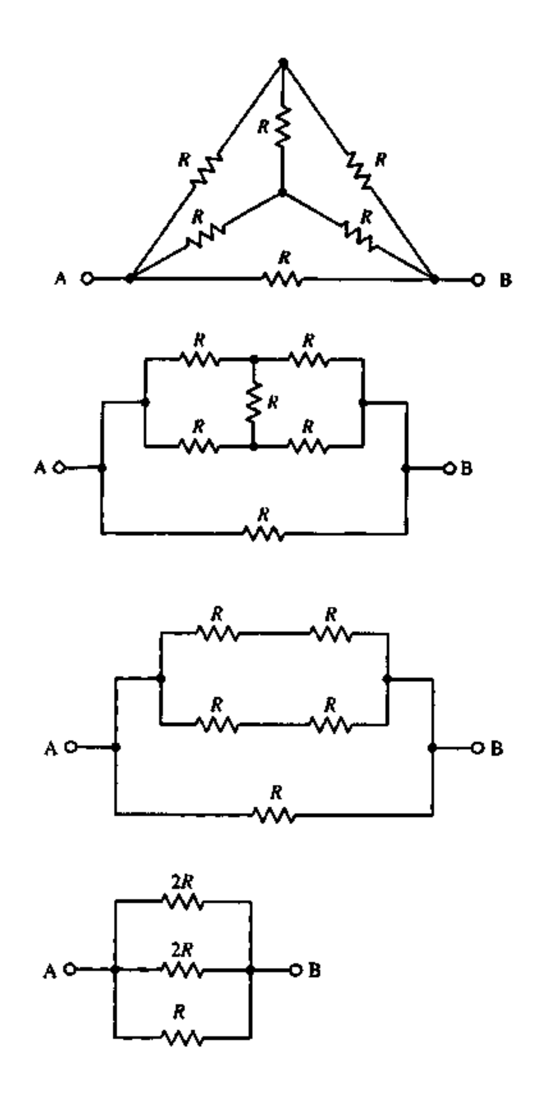
الشكل 11.2

اختزال شبكة مقاومات مركبة (معقدة)

لإيجاد المقاومة المكافئة لشبكة مركبة من المقاومات يتم تحصيل المقاومات الموصولة على التسلسل بمقاومة مكافئة والمقاومات الموصولة على التوازي بمقاومة مكافئة، ويكرّر هذا العمل من جديد حتى إيجاد المقاومة المكافئة النهائية الكلية، ونعرض فيما يلي مثالاً عن اختزال شبكة مركّبة من المقاومات وهذه الشبكة مبينة في الشكل (12.2) الشكل العلوي، حيث يُطلب إيجاد المقاومة المكافئة بين النقاط (A) و(B). ولتحقيق المطلوب يعاد رسمها لتصبح كما في الشكل الثاني من الأعلى في (12.2) ومن هذا الشكل نلاحظ أنه يمكن حذف المقاومة العمودية الموجودة في الطرف الواقع أعلى (A) و(B) لأنه لا يمر تيار في هذه المقاومة لأن الجهود بين طرفيها متساوية وبذلك تصبح الدارة كما في الشكل الثالث من (12.2). إذا كانت المقاومات غير متساوية لا يمكن حذف هذه المقاومة. لاحظ أن الشكل أصبح بسيطاً ويمكن اعتماداً على المعلومات المتوفرة لدينا اختزال هذا الشكل لأن المقاومات بين (A) و(B) موجودة في ثلاثة فروع. في الفرع العلوي لديك مقاومتان تسلسليتان (R) و(R) والمقاومة المكافئة لهما $R_{eq1} = R + R = 2R$، في الفرع الذي يليه لديك أيضاً مقاومتان تسلسليتان (R) و(R) والمقاومة المكافئة لهما $R_{eq2} = R + R = 2R$ وبذلك يؤول الشكل إلى ثلاث مقاومات تفرعية والمقاومة المكافئة الكلية R_{eq} تُحسب من العلاقة التالية:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{2R} + \frac{1}{2R} + \frac{1}{R} = \frac{2}{R} \Rightarrow$$

$$R_{eq} = \frac{R}{2}$$



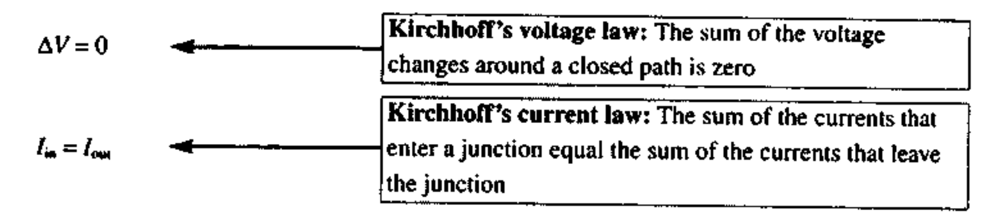
الشكل 12.2

9.2 قوانين كيرشوف

غالباً ما يواجه المتعامل مع الدارات الإلكترونية دارات لا يمكن تحليلها فقط بالاعتماد على أسلوب اختزال الدارات الذي تم عرضه في الفقرة السابقة، وحتى لو كان ممكناً إيجاد المقاومة النهائية المكافئة للدارة، فإنه قد يكون من الصعب إيجاد تيارات فروع عقد الدارة وجهودها. وعلى سبيل المثال عندما تصبح الدارة معقدة، فإن استخدام قوانين مقسم الجهد ومقسم التيار غير ممكن دوماً، ولهذه الأسباب لابد من تعلم قوانين ونظريات جديدة، وأهم القوانين التي نحتاجها في تحليل الدارات الإلكترونية هي قوانين كيرشوف، وهذه القوانين تطبق على العناصر الخطية وغير الخطية مهما كان تعقيد الدارة.

قانون كيرشوف للجهد: ينص قانون كيرشوف للجهد على أن مجموع الجهود في حلقة مغلقة يساوي الصفر.

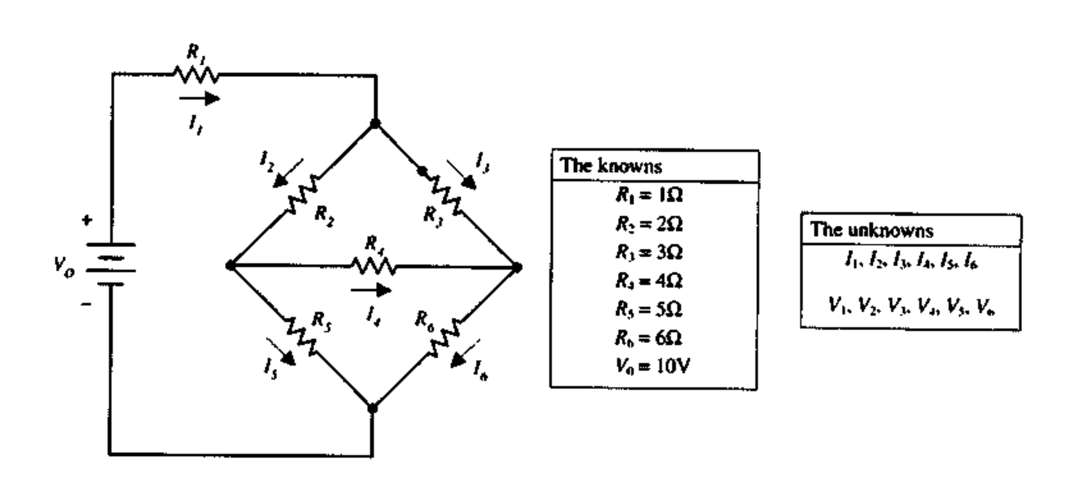
قانون كيرشوف للتيار: ينص قانون كيرشوف للتيار على أن المجموع الجبري للتيارات في عقدة يساوي الصفر، ويبيِّن الشكل (13.2) ملخصاً بسيطاً جداً لقوانين كيرشوف.



الشكل 13.2

إن قانون كيرشوف للجهد هو تعبير عن مبدأ انحفاظ الطاقة فلو تحركت شحنة كهربائية عبر حلقة مغلقة من نقطة ثم عادت إلى نفس تلك النقطة، عندها يكون مقدار التغيّر في الطاقة الكامنة لهذه الشحنة مساوياً للصفر. أما قانون كيرشوف للتيار فهو تعبير عن مبدأ انحفاظ الشحنة التي تجري عبر الدارة. فيما يلي نتعرف على مثال بسيط يوضح تطبيق قوانين كيرشوف.

لتكن لديك الدارة المعطاة في الشكل 14.2. بتطبيق قوانين كيرشوف على الدارة يمكن حساب التيارات I_1، I_2، I_3، I_4، I_5 وI_6، وذلك بفرض أن المقاومات R_1، R_2، R_3، R_4، R_5، R_6 معلومة وأن الجهد (V_0) معلوم أيضاً. بعد ذلك يمكن حساب هبوطات الجهد على المقاومات، حيث يمكن إيجاد V_1، V_2، V_3، V_4، V_5 وV_6 اعتماداً على قانون أوم $V_n = I_n.R_n$. ولحل هذه المسألة يُطبق قانون كيرشوف للجهد على عدد كاف من الحلقات المغلقة وكذلك يُطبق قانون كيرشوف للتيار على عدد كاف من العقد بحيث تحصل على عدد من المعادلات يساوي عدد المجاهيل وبحل المعادلات تحصل على المطلوب. من الشكل 15.2 وحسب قوانين كيرشوف تحصل على المعادلات التالية؛ حيث نبدأ بتطبيق قوانين كيرشوف للتيار في العقد.



الشكل 14.2

$I_1 = I_2 + I_3$ (في العقدة a)

$I_2 = I_5 + I_4$ (في العقدة b)

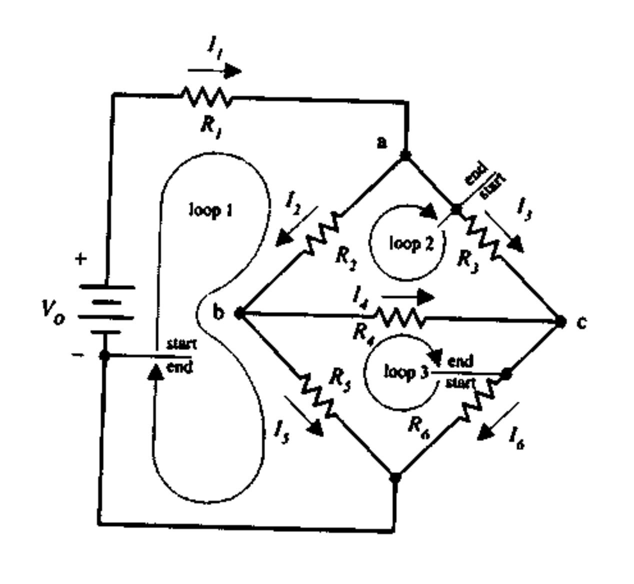
$I_6 = I_4 + I_3$ (في العقدة c)

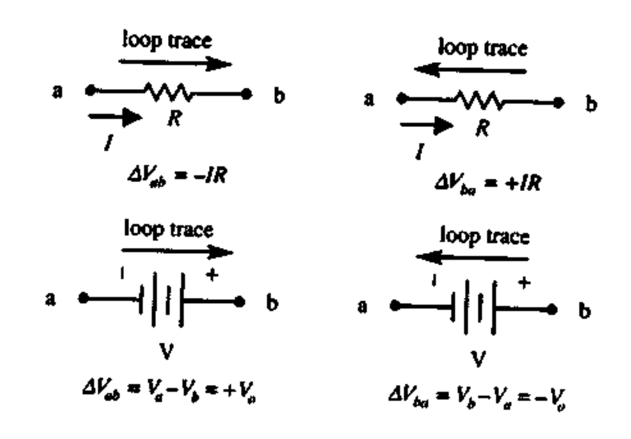
ووفقاً لقانون كيرشوف للجهد في الحلقات المغلقة نجد أن:

$V_0 - I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_6 R_5 = 0$ (في الحلقة 1)

$-I_3 R_3 + I_4 R_4 + I_2 R_2 = 0$ (في الحلقة 2)

$-I_6 R_6 + I_5 R_5 - I_4 R_4 = 0$ (في الحلقة 3)



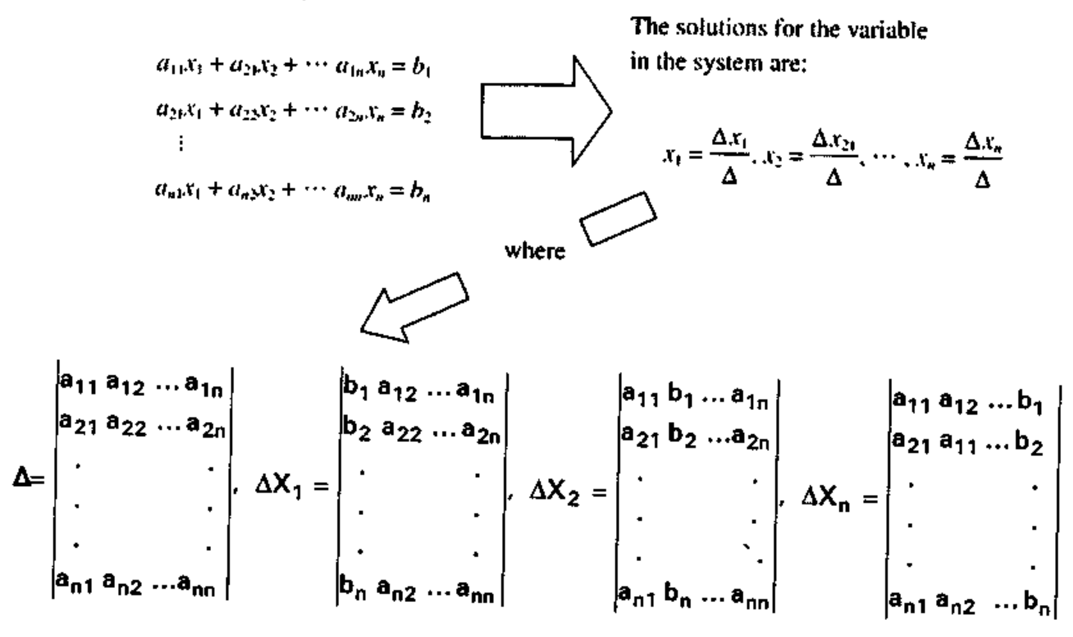


الشكل 15.2

تم استخدام الاصطلاحات المبينة أسفل الشكل (15.2) لتحديد إشارات هبوط الجهد على المقاومات في الحلقات وكذلك لتحديد إشارة جهد البطارية.

من معادلات كيرشوف للجهود في الحلقات وللتيارات في العقد نحصل كما هو واضح على ست معادلات بستة مجاهيل، وحسب قوانين الجبر إذا كان عدد المعادلات يساوي عدد المجاهيل فإن حل المعادلات ممكن ويمكن الحصول على المجاهيل. هناك عدة طرق لحل جملة معادلات وإحدى هذه الطرق تسمى طريقة التعويض حيث يتم جمع كل المعادلات مع بعض بعد ضرب المعادلات بثوابت معينة وبنتيجة الجمع نحصل على معادلة بمجهول واحد نحسب قيمته، نعوِّض قيمة هذا المجهول في معادلة أُخرى ونكرر العملية حتى نحصل على قيم كافة المجاهيل. هناك طريقة أخرى أوضح وأبسط وهي طريقة استخدام المصفوفات (matrices)، ويمكن الإطلاع على تفصيلات هذه الطريقة في كتب الجبر الخطي. الطريقة الأخيرة التي سنذكرها لحل جملة المعادلات هي طريقة استخدام المعينات (determinants) والاستفادة من قاعدة كرامر Cramer's rule، وميزة هذه الطريقة هي أنها تغنيك عن الحاجة لتعميق معلوماتك الرياضية إذا كان لديك برنامج حاسوبي أو آلة حاسبة لحساب المعينات وكل ما يُطلب منك في هذه الحالة هو إدخال الأرقام إلى شبكة تشبه الجدول والضغط بعد ذلك على زر "يساوي". لن نطيل الآن في شرح تفاصيل الطريقة ونكتفي بإعطاء المعادلات وباستخدام المعادلات لإيجاد أحد المجاهيل في مسألة دارة المقاومات.

يبيِّن الشكل 15.2 جملة معادلات خطية (n) معادلة بـــ (n) مجهول ويبيِّن طريقة إيجاد قيم المجاهيل وهي هنا x_1، x_2 حتى x_n، أما المعاليم فهي الثوابت a_{11}، a_{12}، .... حتى a_{mn}.



$$a_{11}x_1 + a_{21}x_2 + \cdots a_{1n}x_n = b_1$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots a_{2n}x_n = b_2$$
$$\vdots$$
$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots a_{nn}x_n = b_n$$

$$x_1 = \frac{\Delta x_1}{\Delta}, x_2 = \frac{\Delta x_{21}}{\Delta}, \cdots, x_n = \frac{\Delta x_n}{\Delta}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}, \quad \Delta X_1 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ b_2 & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ b_n & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}, \quad \Delta X_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & b_2 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & b_n & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}, \quad \Delta X_n = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & b_1 \\ a_{21} & a_{11} & \cdots & b_2 \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & b_n \end{vmatrix}$$

الشكل 16.2

لإيجاد المعيَّن Δ في جملة معادلات مسألة دارة المقاومات نعوِّض قيم المقاومات وقيمة الجهد V_0 في العلاقات فنحصل على المعادلات التالية:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$I_2 - I_5 - I_4 = 0$$

$$I_6 - I_4 - I_3 = 0$$

$$I_1 + 2I_2 + 5I_5 = 10$$

$$-3I_3 + 4I_4 + 2I_2 = 0$$

$$-6I_6 + 5I_5 - 4I_4 = 0$$

ومن هذه المعادلات نجد أن:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 2 & -3 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4 & 5 & -6 \end{vmatrix} = -587$$

لإيجاد التيار I_5 الذي يمر عبر المقاومة R_5 يجب إيجاد ΔI_5 وعندها يكون:

$$I_5 = \frac{\Delta I_5}{\Delta}$$

$$\Delta I_5 = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 2 & -3 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4 & 0 & -6 \end{vmatrix} = -660'$$

$$I_5 = \frac{\Delta I_5}{\Delta} = \frac{-660}{\Delta} = \frac{-660}{-587} = 1.12A$$

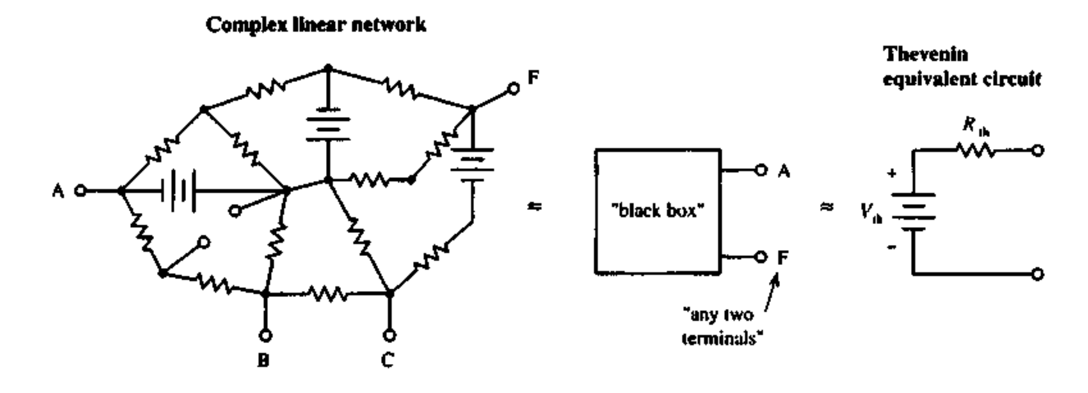
$$V_5 = I_5 R_5 = (1.12A)(5\Omega) = 5.6V$$

لإيجاد أي تيار من التيارات المطلوبة عليك إيجاد معيَّن ذلك التيار ΔI_n وتقسيمه على المعيَّن Δ فمثلاً لإيجاد I_3 نوجد ΔI_3 ونقسمه على Δ أي $I_3 = \frac{\Delta I_3}{\Delta}$ وهكذا بالنسبة لباقي التيارات.

سوف نتعرف الآن على نظرية مساعدة في تحليل الدارات الكهربائية، وهذه النظرية تسهل كثيراً عملية تحليل الدارة وقد تغنيك عن الحاجة لاستخدام جملة معادلات خطية.

10.2 نظرية ثيفينين

إذا أُعطيت دارة كهربائية كالدارة المبينة في الشكل 17.2 وطلب منك معرفة الجهد بين النقطتين (A) و(F) وتحديد (معرفة أو حساب) التيار المار في حمل خارجي مربوط بين هاتين النقطتين. هنا إذا استخدمت قوانين كيرشوف لإيجاد الجهد والتيار المطلوبين ستجد نفسك أمام مشكلة حل جملة معادلات كما في المثال السابق، ولكن ولحسن الحظ فإن نظرية ثيفينين تقدم حلاً سهلاً جداً لهذه المسألة.



الشكل 17.2

حسب طريقة ثيفينين يتم التعويض عن الدارة بكاملها بين النقاط (A) و(F) بصندوق أسود كما في الشكل. وجد ثيفينين أن هذا الصندوق الأسود أو أية دارة خطية يمكن الاستعاضة عنها بمنبع جهد على التسلسل مع مقاومة، يسمى مصدر الجهد بجهد ثيفينين Thevenin voltage (V_{th})، وتسمى المقاومة بمقاومة ثيفينين Thevenin resistance (R_{th}) ويشكل منبع

الجهد V_{th} والمقاومة R_{th} ما يسمى دارة ثيفينين المكافئة Thevenin equivalent circuit، ومن هذه الدارة المكافئة يمكن حساب التيار الذي يمر في الحمل باستخدام العلاقة:

$$I = \frac{V_{th}}{R_{th} + R_{load}}$$

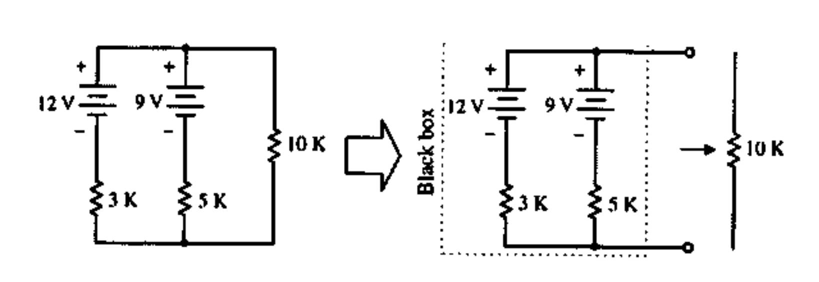
من الضروري الإشارة هنا إلى أن الأطراف (A) و(F) والحمل (R_{load}) الموصول بينهما لا تكون موضحة في الدارة دوماً، وقد تكون R_{load} واحدة من مقاومات الدارة ويُطلب حساب التيار الذي يمر فيها وهبوط الجهد عليها في هذه الحالة تُفصل هذه المقاومة من الدارة وتسمى النقاط التي كانت موصولة بينها باسم (A) و(F) أو أي أحرف أخرى ويتم إيجاد مكافئ ثيفينين للدارة بين هذه النقاط، وبعد إيجاد مكافئ ثيفينين يتم وصل المقاومة التي تم فصلها مع مكافئ ثيفينين ويحسب التيار المار في المقاومة اعتماداً على قانون أوم

$$I = \frac{V_{th}}{R_{th} + R_{load}}$$

ولكن كيف نحسب V_{th} وR_{th}؟. يتم حساب V_{th} بين النقاط (A) و(F) باستخدام طرق تحليل الدارات المذكورة سابقاً، أما المقاومة R_{th} فهي المقاومة المكافئة للدارة بين (A) و(F) بعد قصر كافة مصادر الجهد الموجودة في الدارة، وفيما يلي مثال يوضح طريقة إيجاد V_{th} وR_{th} لدارة محدّدة، وقبل ذلك نبيّن أنه يمكن تحديد V_{th} بالقياس بواسطة مقياس فولت مستمر يوصل بين (A) و(F) بعد فصل المقاومة المعتبرة حملاً بينهما وكذلك يمكن تحديد R_{th} بالقياس بواسطة مقياس أوم بعد استبدال كافة مصادر الجهد المستمر بوصلات قِصر (Short) ويوصل المقياس (Ohm-meter) بين (A) و(F) وتؤخذ القراءة فتكون هي R_{th}.

مثال 1

لتكن لديك الدارة المعطاة في الشكل (18.2) ويُطلب حساب التيار المار في المقاومة 10 kΩ وكذلك الجهد الهابط عليها. لحل هذه المسألة تُفصل المقامة 10 kΩ من الدارة ويتم إيجاد V_{th} وR_{th}.



إيجاد V_{th}:

يتم حساب الجهد بين الأطراف بحساب تيار الحلقة I، ونلاحظ أنّ:

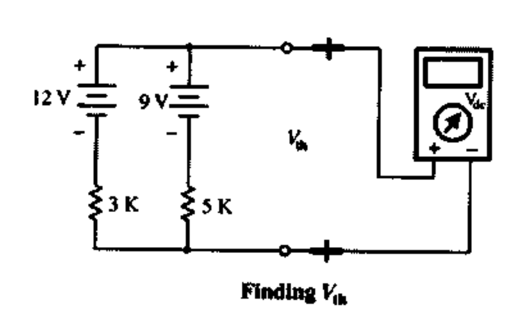
$$I = \frac{12V - 9V}{3k\Omega + 5k\Omega} = 0.375mA$$

يمكن إيجاد V_{th} باستخدام إحدى المعادلات التالية:

$12\ V - (0.375\ mA)\ (3\ k\Omega) = 10.875\ V = V_{th}$

$9\ V - (0.375\ mA)\ (5\ k\Omega) = 10.875\ V = V_{th}$

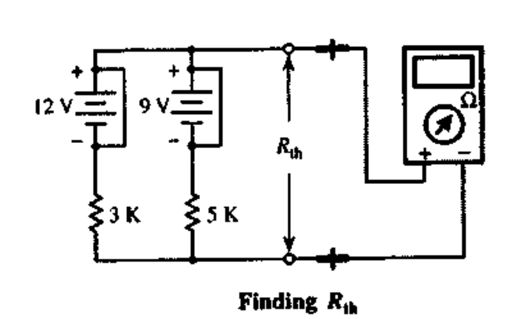
أو يمكن قياس V_{th} قياساً مباشراً بواسطة مقياس فولت مستمر (V_{dc}) بين الطرفين (انظر الشكل).



Finding V_{th}

الشكل 18.2

إيجاد R_{th}:



Finding R_{th}

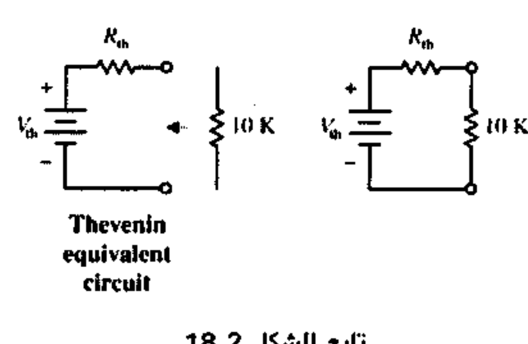
حالة 1: تستبدل مصادر الجهد المستمر الموجود في الدارة بوصلات قصر ويتم إيجاد المقاومة المكافئة حيث نلاحظ أن مقاومات الدارة موصولة على التفرع.

$$\frac{1}{R_{th}} = \frac{1}{3k\Omega} + \frac{1}{5k\Omega} \Rightarrow R_{th} = \frac{(3k\Omega)(5k\Omega)}{(3k\Omega)+(5k\Omega)} = 1.875k\Omega$$

حالة 2: تُقاس المقاومة R_{th} قياساً مباشراً بواسطة مقياس أوم (انظر الشكل) طبعاً بعد استبدال مصادر الجهد (12 V) و(9 V) بوصلات قصر.

ملاحظة هامة: لا تقصر أية بطارية، لأن قصر البطارية يؤدي إلى تفريغها وقد يؤدي إلى تخريبها، وعندما تريد قياس مقاومة ثيفينين R_{th} افصل البطاريات من الدارة وضع بدلاً عنها وصلات قصر (سلك).

الآن وبعد أن أصبحت R_{th} معلومة وكذلك V_{th} يمكن رسم دارة مكافئ ثيفينين، يُعاد وصل المقاومة 10 kΩ مع مكافئ ثيفينين من أجل إيجاد الجهد عليها وكذلك لحساب تيارها بالاعتماد على قوانين بسيطة أصبحت معروفة



Thevenin equivalent circuit

تابع الشكل 18.2

$$V_R = \frac{R}{R+R_{th}}V_{th}$$

$$= \frac{10k\Omega}{10k\Omega + 1.875k\Omega}(12.875V) = 10.842V$$

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{10.842V}{10k\Omega} = 1.084mA$$

مثال 2

في الشكل 19.2 تُعطى دارة يُطلب فيها ما يلي:

أ- إيجاد مكافئ ثيفينين على يسار النقاط a وb.

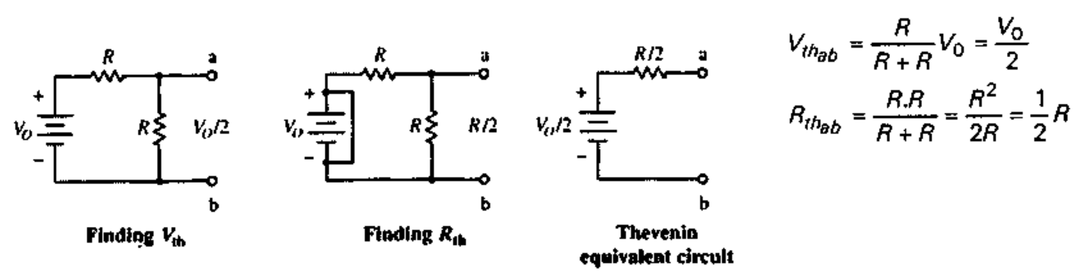
ب- أوجد مكافئ ثيفينين على يسار النقاط c وd.

ج- أوجد الجهد بين النقاط e وf.

حل الطلب (أ): نفصل كافة عناصر الدارة الموجودة على يمين (a) وb ونوجد مكافئ ثيفينين

$$V_{th_{ab}} = \frac{R}{R+R}V_0 = \frac{V_0}{2}$$

$$R_{th_{ab}} = \frac{R.R}{R+R} = \frac{R^2}{2R} = \frac{1}{2}R$$

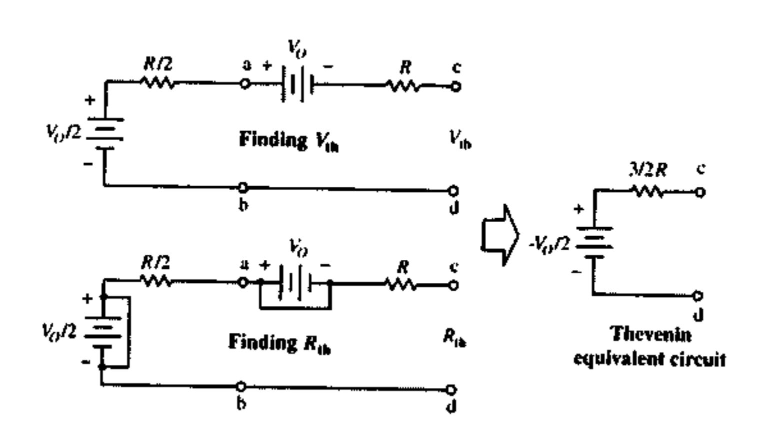


الشكل 19.2

حل الطلب (ب): لإيجاد مكافئ ثيفينين على يسار (c) و(d) نفصل المقاومة R الموصولة بين (c) و(d) لأنها تشكل حملاً للدارة ونوصل مكافئ Thevenin ثيفينين الذي أوجدناه في الطلب أ بين (a) و(b)، انظر الشكل وتوجد مكافئ ثيفينين الجديد (طبعاً هنا نستبدل مصادر الجهد بقصر)

$$R_{thcd} = \frac{R}{2} + R = \frac{3}{2}R;$$

$$V_{thcd} = \frac{V_0}{2} - V_0 = -\frac{V_0}{2}$$



عند إيجاد مكافئ ثيفينين هنا لاحظ أنه لإيجاد (V_{thcd}) يكفي فقط إيجاد $\left(\frac{V_0}{2} - V_0\right)$ لأن التيار المار في الدارة يساوي الصفر ولا توجد هبوطات على المقاومات $\left(\frac{R}{2}\right)$ و(R) ولذلك لا تؤثر هذه المقاومات نهائياً على (V_{thcd}).

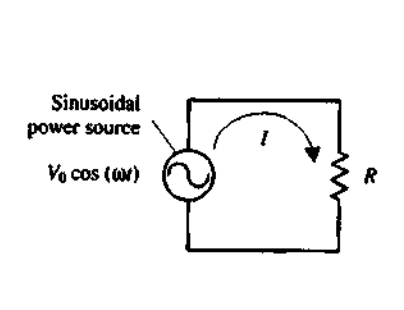
حل الطلب (جـ): لإيجاد الجهد بين (e) و(f) نوصل المقاومة R إلى مكافئ ثيفينين بين (c) و(d)، انظر الشكل ونجد أن

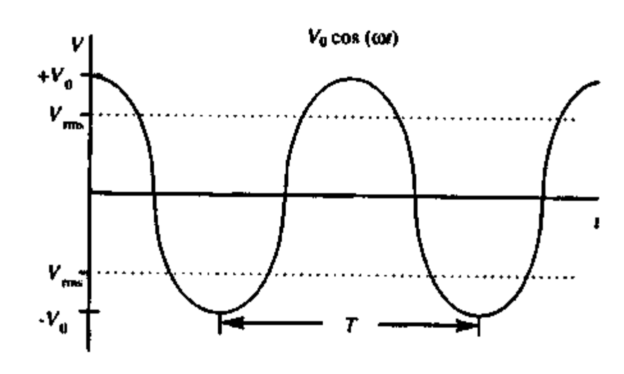
$$V_{ef} = \frac{R}{R + \frac{3}{2}R} V_{thcd} = \frac{R}{R + \frac{3}{2}R}\left(-\frac{V_0}{2}\right) = -\frac{V_0}{5}$$

تابع الشكل 19.2

11.2 مصادر الاستطاعة الجيبية

إن مصدر الاستطاعة الجيبي هو عبارة عن أداة (جهاز) يُعطي بين طرفيه جهداً يتغيَّر بشكل جيبي بتغير الزمن، وإذا تم وصل مقاومة أومية صرفة بين طرفي هذا المنبع، فإن التيار الذي يمر في المقاومة هو أيضاً تيار جيبي له نفس تردد جهد المصدر ويكون التيار والجهد في المقاومة متفقين بالصفحة. يسمى التيار الذي يتغير جيبيّاً باسم التيار المتناوب (alternating current) أو (ac current).





الشكل 20.2

يمكن التعبير عن الجهد الذي يولده المصدر الجيبي بالعلاقة:

$$v = V_0 . \cos \omega t$$

V_0: المطال أو الجهد الأعظمي [عندما $\cos \omega t = 1$].

ω: التردد الزاوي وواحدته الراديان على الثانية أو بالدرجة على الثانية.

كما يمكن أيضاً أن يكون الجهد الجيبي معطى بالعلاقة:

$$v = V_0 . \sin \omega t$$

والفرق بين الحالتين هو فقط إزاحة صفحية بمقدار ربع دور، والدور T هو مقلوب التردد f أي $(T = 1/f)$ و$(\omega = 2\pi.f)$.
سوف نستخدم معادلة التجيب $V_0 \cos \omega t$ للتعبير عن الجهد المتناوب لأنها تسهل الحسابات. يمكن إيجاد معادلة التيار (I) الذي يمر في المقاومة (R) بتطبيق قانون أوم.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_0 \cos \omega t}{R}$$

لاحظ من الشكل أن الجهد الجيبي يكرر نفسه بعد مرور دور (T).

يمكن حساب الاستطاعة اللحظية المصروفة في الدارة البسيطة المعطاة في الشكل (20.2) من العلاقة:

$$P = V.I = I^2.R$$

ولكن معرفة الاستطاعة اللحظية (أي الاستطاعة في لحظة ما) ليست ذات فائدة عملية ويُفضَّل عملياً معرفة أو حساب الاستطاعة المتوسطة خلال دور كامل، ويتم ذلك عملياً بجمع الاستطاعات اللحظية خلال دور كامل، ويمكن تحقيق الجمع بمكاملة الجداء $(I^2.R)$ خلال دور وتقسيم الناتج على الدور (T):

$$\overline{P} = \frac{1}{T}\int_0^T I^2 R.dt = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{V_0^2 \cos^2 \omega t}{R} dt = \frac{V_0}{2R}$$

12.2 القيمة المنتجة (الفعالة) للجهد المتناوب الجيبي

تُعرَّف القيمة المنتجة أو الفعالة للجهد الجيبي المتناوب (ac) بأنها قيمة جهد مستمر (dc) قادر على إنجاز نفس المقدار من العمل الذي ينجزه الجهد المتناوب (ac). والقيمة المنتجة للجهد الجيبي المتناوب تساوي جداء القيمة العظمى (V_0) مضروباً بـ $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$، أي أن

$$V_{rms} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} = (0.707).V_0$$

وعادة تُعطى قيمة جهد شبكة المدينة كقيمة منتجة، فمثلاً في الولايات المتحدة الأمريكية تبلغ قيمة جهد شبكة المدينة 120 V (القيمة المنتجة) وهذا يعني أن القيمة العظمى لهذا الجهد هي $(120 \times \sqrt{2})$ ومعادلة هذا الجهد هي:

$$v = 120\sqrt{2} \cos \omega t = 170 \cos \omega t$$

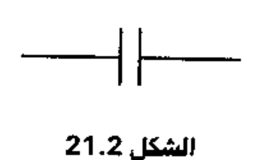
يمكن حساب الاستطاعة المصروفة في دارة الشكل (20.2) بدلالة القيمة المنتجة للجهد كما يلي، (الاستطاعة المحسوبة هنا هي استطاعة متوسطة).

$$\overline{P} = \frac{V_0^2}{2R} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}.\frac{V_0}{\sqrt{2}}.\frac{1}{R} = \frac{V_{rms}^2}{R}$$

13.2 المكثفات

إذا كانت لديك صفيحتان متباعدتان عن بعضهما مسافة ثابتة، وإحدى هاتين الصفيحتين مشحونة بشحنة (Q+) والأخرى بشحنة (Q-)، عندها ينشأ جهد بين الصفيحتين، إذا تم وصل الصفيحتين بسلك فإن تياراً يمر من الصفيحة موجبة الشحنة عبر السلك إلى الصفيحة سالبة الشحنة ويستمر مرور التيار حتى تتعادل شحنتا الصفيحتين (تصبح كل صفيحة معتدلة الشحنة).

يسمى مقدار الشحنة المفصولة المتراكمة على الصفيحتين باسم السعة (capacitance) وتسمى العناصر التي تصمم خصيصاً لفصل الشحنات باسم مكثفات (Capacitors) ويُعطى رمز المكثف في الشكل (21.2).



الشكل 21.2

ويُقال إن المكثف مشحون عند وجود شحنات مفصولة على الصفيحتين، ويقال إن المكثف مشحون بشحنة تساوي Q (شحنة المكثف)، طبعاً أحد القطبين مشحون إيجابياً والآخر سلبياً وشحنة أحد القطبين (الصفيحتين) تساوي بالقيمة وتعاكس بالإشارة شحنة القطب الآخر، والمكثف ككل ذو شحنة كلية تساوي الصفر لأن مجموع الشحنات على القطبين يساوي الصفر (المجموع الجبري). تتناسب شحنة المكثف (Q) مع الجهد (V) المطبق بين صفائحه وثابت التناسب هو سعة المكثف، والتي يُرمز لها بالرمز (C) وعليه فإن

$$Q = C.V ; C = \frac{Q}{V}$$

وتعتبر (C) موجبة دوماً، واحدة المكثف هي الفاراد (Farad) ويرمز لواحدة المكثف اختصاراً بالرمز (F) وواحد فاراد يساوي واحد كولومب على واحد فولت (one coulomb per volt).

$$1\ F = 1\ C/V$$

تتراوح قيم المكثفات عادة بين (1 PF) وآلاف الميكروفاراد (μF) والميكروفاراد = 10^{-6} F، والـ 10^{-3} F = 1000 μF. إذا وصل مكثف بين قطبي بطارية فإن إحدى الصفيحتين تكتسب شحنة (Q+) والآخر (Q-) ولا يمر تيار عبر المكثف (بفرض أن المكثف يوصل مع البطارية لفترة من الزمن) وقد يبدو هذا الأمر غريباً إذ يوجد هنا فصل للشحنات، ولكن إذا وصل المكثف إلى طرفي مصدر جهد متناوب فإن تياراً يسمى تيار الإزاحة (displacement current) سوف يمر، وتيار الإزاحة ليس تياراً تقليدياً، ولكنه ينشأ عندما تُشحن إحدى الصفيحتين أو تفرَّغ مع الزمن، وعندما تنتقل الشحنات إلى موضع على إحدى الصفيحتين ينشأ حقل مغناطيسي متغيِّر وهذا الحقل المغناطيسي يحرض تياراً على المرور خارجاً من الصفيحة الأخرى، ومن أجل إيجاد تيار الإزاحة نستخدم العلاقة Q = C.V وكذلك علاقة تعريف التيار (I = dQ/dt).

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(CV)}{dt} = C.\frac{dV}{dt}$$

ويمكن من هذه المعادلة استخراج علاقة الجهد على طرفي المكثف كتابع للتيار

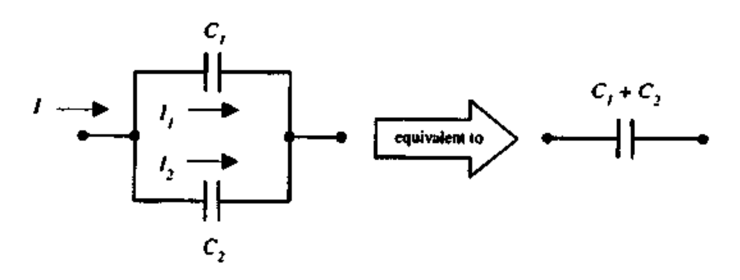
$$V = \frac{1}{C}\int I\,dt$$

وبعكس المقاومة فإن المكثف لا يبدِّد الاستطاعة، ولكنه يخزنها بين صفائح على شكل حقل كهربائي ويمكن استعادة الاستطاعة عند تفريغ المكثف. وتحسب الطاقة المختزنة في المكثف باستخدام العلاقة التالية:

$$W = \int V.I.dt = \int V.C.\frac{dV}{dt}dt = \int C.V.dV = \frac{1}{2}CV^2$$

وصل المكثفات على التفرع (التوازي)

لإيجاد السعة المكافئة أو المكثف المكافئ لمكثفين موصولين على التوازي كما في الشكل (22.2) يُطبق قانون كيرشوف للتيار على العقدة اليسارية.



الشكل 22.2

$$I = I_1 + I_2$$

$$I = C_1.\frac{dV}{dt} + C_2.\frac{dV}{dt}$$

الجهد المطبق هو نفسه على المكثفين:

$$I = (C_1 + C_2).\frac{dV}{dt}$$

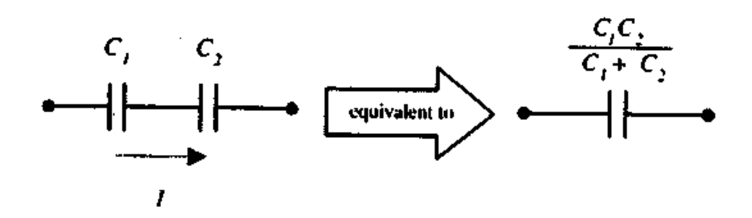
$$C_{eq} = C_1 + C_2$$

C_{eq}: هي سعة المكثف المكافئ وتساوي مجموع سعتي المكثفين، وعند وصل عدة مكثفات على التوازي فإن سعة المكثفة المكافئة ستكون:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots\dots\dots\dots + C_n$$

وصل المكثفات على التسلسل

يبيِّن الشكل 23.2 مكثفين موصولين على التسلسل ولإيجاد المكثف المكافئ يُطبق قانون كيرشوف للجهد على المكثفين مع ملاحظة أن التيار المار في كلٍ منهما متساوٍ.



الشكل 23.2

$$V = \frac{1}{C_1}\int Idt + \frac{1}{C_2}\int Idt = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)\int Idt$$

$\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ هي سعة المكثف المكافئ ولذلك يمكن أن نكتب

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}; C_{eq} = \frac{C_1.C_2}{C_1 + C_2}$$

وفي حال وصل عدة مكثفات على التسلسل تكون سعة المكثف المكافئ معطاة بالعلاقة:

$$\frac{1}{C_{eq}}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+.............+\frac{1}{C_n}$$

14.2 مفاعلة المكثف

يسمح المكثف الموصول مع منبع جهد جيبي لتيار الإزاحة بالمرور عبره وذلك لأن الجهد على طرفي المكثف يتغير (تذكر أن I = C du/dt في المكثف) وإذا كان الجهد الجيبي معطى بالعلاقة:

$$v = V_0 Cos\omega t \Rightarrow$$

$$I = C\frac{dv}{dt} = C\frac{d}{dt}(V_0 Cos\omega t) = -\omega c V_0 Sin\omega t$$

ويمر تيار أعظمي في المكثف عندما يكون $Sin\omega t = -1$ وبذلك يمكن التعبير عن التيار بالمعادلة التالية:

$$I = -I_0 \ Sin\omega t$$

I_0: القيمة العظمى للتيار المار في المكثف.

ومن مقارنة المعادلتين الأخيرتين نجد أن:

$$I_0 = \omega c \ V_0$$

إن نسبة $\frac{V_0}{I_0}$ تشبه المقاومة وتُعطى بالأوم، ولكن وبما أن الظاهرة الفيزيائية للمقاومة تختلف عن الحالة في المكثف فإن نسبة الجهد الأعظمي إلى التيار الأعظمي في المكثف تسمى مفاعلة (reactance).

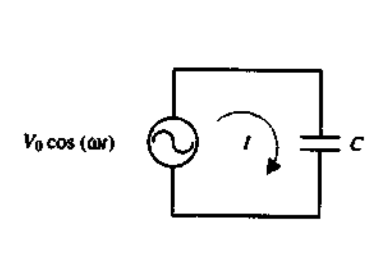
في المقاومة يتم تبديد للاستطاعة بسبب مرور التيار فيها، أما في المكثف فلا يتم تبديد للاستطاعة وإنما يتم تخزين الاستطاعة. يُرمز لمفاعلة المكثف اختصاراً بالرمز (X_c) ويُعبَّر عنها بالمعادلة:

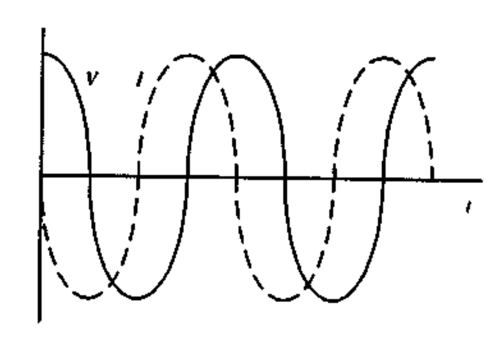
$$X_c=\frac{V_0}{I_c}=\frac{V_0}{\omega c V_0}=\frac{1}{\omega c}$$

عندما ينتهي (ω) إلى اللانهاية تنتهي مفاعلة المكثف إلى الصفر ويمكن اعتبار المكثف وصلة قصر ولذلك يقال إن المكثف يُمرر تيارات الترددات العالية. أما عندما ينتهي (ω) إلى الصفر فإن (X_c) تنتهي إلى اللانهاية ويعمل المكثف كدارة مفتوحة (Open Circuit)، ولذلك يقال إن المكثف لا يمرر الترددات المنخفضة. يمكن كتابة معادلة تيار المكثف كما يلي:

$$I = -I_0 \ Sin \ \omega t = I_0 \ Cos(\omega t + 90°)$$

وبمقارنة معادلة تيار المكثف مع معادلة الجهد المطبق على طرفيه نجد أن هناك فرقاً في الصفحة قدره (90°) أو ($\frac{\pi}{2}$ راديان) ومن الواضح أن التيار يتقدم على الجهد بزاوية صفحة تساوي (90°)، انظر الشكل (24.2).

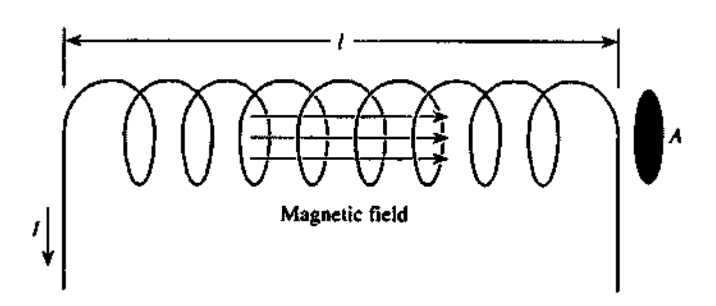




الشكل 24.2

15.2 الملفات

الملف هو عنصر كهربائي يعاكس سلوكه في الدارة سلوك المكثف وهو يقاوم تغيرات التيار ويمرر التيارات المستمرة (dc). وهو أي الملف يشبه ملفاً لولبياً كما في الشكل (25.2).



الشكل 25.2

إذا كانت مساحة مقطع الملف تساوي (A) وكان للملف عدد محدَّد من اللفات في واحدة الطول (N/l)، فإذا مَر تيار كهربائي (I) عبر هذا الملف ينشأ حسب قانون أمبير (Amper's law) فيض مغناطيسي

$$\phi = B.A = \mu NIA/l$$

وتكون جهة التدفق المغناطيسي معاكسة لجهة جريان التيار. تسمى μ بنفاذية المادة التي يُلف الملف حولها (وغالباً ما تكون هذه المادة إما حديد أو هواء) وفي الفضاء الحر (free space) تكون μ معطاة بالمعادلة

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} N/A^2$$

وحسب قانون فاراداي (Faraday's law) يكون الجهد المتحرض بين طرفي الملف

$$V = N\frac{d\phi}{dt} = \frac{\mu N^2 A}{l}.\frac{dI}{dt} = L.\frac{dI}{dt}$$

يسمى الثابت $\frac{\mu N^2 A}{l}$ باسم التحريضيّة (inductance) ويرمز لها اختصاراً بالرمز (L). وواحدة التحريضية هي الهنري (H) والهنري الواحد يساوي واحد ويبر (weber) على الأمبير.

تتراوح القيم النموذجية للتحريضيات بين 1 μH أي (10^{-6}H) وحتى (1 H). لإيجاد معادلة تيار الملف يمكن إعادة كتابة المعادلة الأخيرة لتعبر عن التيار بدلالة الجهد.

$$I = \frac{1}{L}\int v dt$$

والملفات (كما هو الحال في المكثفات) لا تبدد الطاقة وإنما تخزن الطاقة على شكل حقل مغناطيسي ويمكن حساب الطاقة المخزونة في ملف من العلاقات

$$P = V.I$$

$$P = \frac{dw}{dt} \Rightarrow W = \int I.Vdt = \int I.L\frac{dI}{dt}dt = \int L.I.dI \Rightarrow$$

$$W = \frac{1}{2}LI^2$$

وصل الملفات على التسلسل

يمكن إيجاد تحريضية الملف المكافئ لتحريضية ملفين موصولين على التسلسل بتطبيق قانون كيرشوف للجهد، وباعتبار الجهد على طرفي الملف L_1 هو

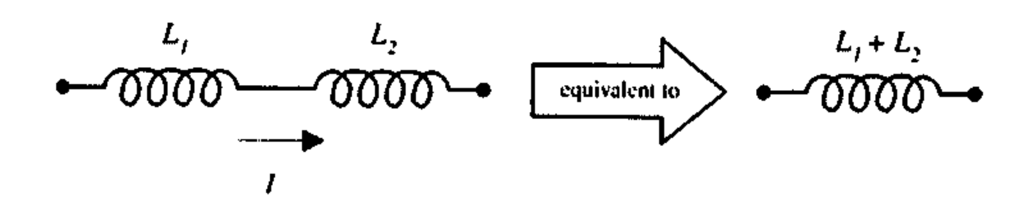
$$L_1 . \frac{dI}{dt} = V_1$$

والجهد على طرفي الملف L_2 هو V_2

$$L_2 . \frac{dI}{dt} = V_2$$

وذلك باعتبار التيار (I) هو نفسه المار في الملفين

$$V = V_1 + V_2 = L_1 . \frac{dI}{dt} + L_2 \frac{dI}{dt} = (L_1 + L_2) \frac{dI}{dt}$$



الشكل 26.2

تسمى $(L_1 + L_2)$ التحريضية المكافئة للملفين موصولين على التسلسل كما تسمى أيضاً الملف المكافئ ويرمز لها بالرمز L_{eq} وعليه فإن

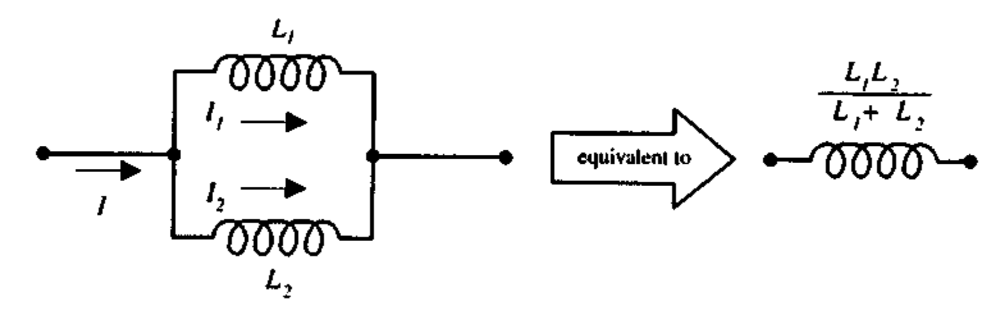
$$L_{eq} = L_1 + L_2$$

في حال وصل عدة ملفات على التسلسل فإن الملف المكافئ يكون

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + \dots\dots\dots\dots + L_n$$

وصل الملفات على التوازي

توصل الملفات على التوازي (التفرع) كما في الشكل (27.2) الذي يبيِّن ملفين موصولين على التفرع.



الشكل 27.2

من الشكل يتضح أن الجهد المطبق على طرفي الملفين هو نفس الجهد وبتطبيق قانون كيرشوف للتيار على العقدة اليسارية نجد أن:

$$I = I_1 + I_2$$

$$= \frac{1}{L_1}\int Vdt + \frac{1}{L_2}\int Vdt = \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}\right)\int Vdt$$

تسمى $\left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}\right)$ بتحريضية الملف المكافئ للملفين الموصولين على التوازي ويمكن أن نكتب:

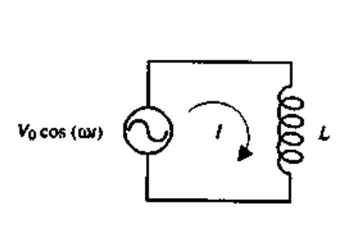
$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \Rightarrow L_{eq} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$$

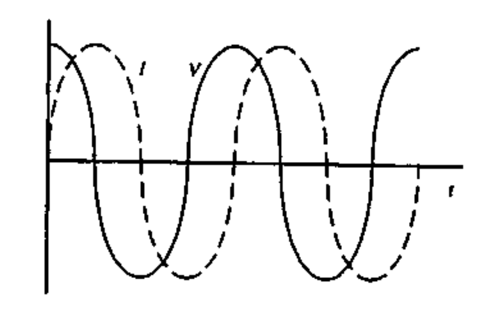
عند وصل عدة ملفات على التوازي يُعطى الملف المكافئ بالعلاقة:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_4} + \dots\dots + \frac{1}{L_n}$$

16.2 مفاعلة الملف

إذا وُصِل ملف كما في الشكل (28.2) مع منبع جهد جيبي فإن تياراً (I) يمر عبر الملف.





الشكل 28.2

إذا كان منبع الجهد معطى بالعلاقة:

$$v = V_0 \, Cos\,\omega t \Rightarrow$$

$$I = \frac{1}{L}\int vdt = \frac{1}{L}\int V_0 Cos\,\omega t\, dt = \frac{V_0}{\omega L} Sin\,\omega t$$

يسمى المقدار $\frac{V_0}{\omega L}$ باسم القيمة العظمى للتيار ويُرمز له بالرمز I_0 أي أن:

$$I_0 = \frac{V_0}{\omega L} \Rightarrow \frac{V_0}{I_0} = \omega L$$

نسبة الجهد الأعظمي (V_0) إلى التيار الأعظمي (I_0) تشبه بشكلٍ عام نسبة الجهد إلى التيار التي واحدها (Ω). هنا ظاهرة المقاومة في الملف تعني أن التيار العكسي في الملف يُقاوم التيار الأمامي وهي تختلف عن ظاهرة المقاومة في المقاومات التقليدية والتي تتلخص في أن القاومة تُبدد الطاقة، أما ظاهرة المقاومة في الملف فإنها تسمى مفاعلة الملف أو مفاعلة تحريضيّة (inductive reactance) ويُرمز لها بالرمز (X_L) وتُعطى بالمعادلة التالية

$$X_L = \frac{V_0}{I_0} = \frac{V_0}{\frac{V_0}{\omega L}} = \omega L$$

عندما تنتهي (ω) إلى اللانهاية تنتهي (X_L) أيضاً إلى اللانهاية ويعمل الملف كدارة مفتوحة (open circuit) ولذلك يقال إن الملف لا يمرر التيارات عالية التردد، أما عندما تنتهي ω إلى الصفر فإن (X_L) تنتهي إلى الصفر ويعمل الملف كوصلة قصر وبالتالي فإن الملف يمرر التيارات المنخفضة وخاصة التيارات المستمرة (التي ترددها يساوي الصفر).

يمكن كتابة معادلة تيار الملف بالعلاقة

$$I = I_0 \sin \omega t = I_0 (\cos \omega t - 90°)$$

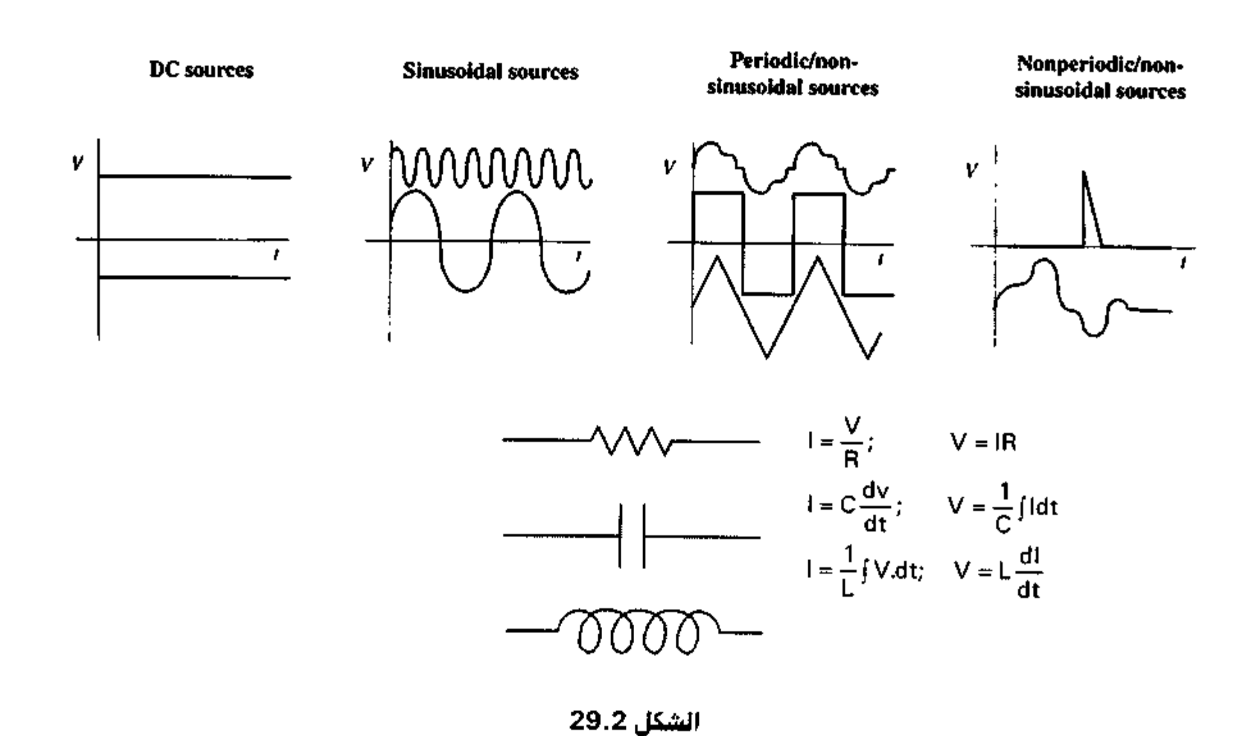
وذلك باعتبار أن الجهد المطبق على طرفي الملف هو

$$v = V_0 \cos \omega t$$

وبذلك نلاحظ وجود فرق صفحة بين التيار والجهد في الملف قدره (90°) وواضح أن التيار يتأخر عن الجهد بزاوية قدرها 90° أو $\left(\frac{\pi}{2}\right)$ راديان.

17.2 الجهود الأساسية والدارات

يتم التعامل في الإلكترونيات مع أربعة أنواع أساسية من الجهود هي الجهد المستمر (dc)، والجهد الجيبي، والجهد الدوري اللاجيبي (periodic nonsinusoidal)، والجهد اللادوري اللاجيبي (nonperiodic nonsinusoidal) وهذه الجهود مبينة في الشكل (29.2).



الشكل 29.2

أما العناصر غير الفعالة (السلبية) الأساسية في الدارات الإلكترونية فهي المقاومة، والمكثف، والملف، ويبيّن الشكل 29.2 رموز هذه العناصر وعلاقات الجهود والتيارات فيها. يمكن من حيث المبدأ تحليل أية دارة مكونة من هذه العناصر وأي منبع جهد من المنابع السابقة باستخدام قوانين كيرشوف وعلاقات جهود وتيارات هذه العناصر، ولكن عندما تصبح الدارات أكثر تعقيداً وتكون منابع الجهد غير جيبيّة (مربعة مثلاً) فإن تحليل الدارات اعتماداً على قوانين كيرشوف يصبح

معقداً ويحتاج إلى مهارة رياضية عالية، ولكن ولحسن الحظ توجد طرق أخرى للتعامل مع مثل هذه الدارات تمكنك من تجنب التعامل مع علاقات ومعالجات رياضية شاقة. أحياناً لابد من العودة إلى التحليل الرياضي ويبيّن لك الجدول (1.2) نماذج الدارات ودرجات الصعوبة في التعامل معها ومستوى المعلومات الذي قدمناه عنها في هذا الفصل حتى الآن.

الجدول (1.2): المتطلبات الرياضية اللازمة لتحليل الأنواع المختلفة من الدارات.

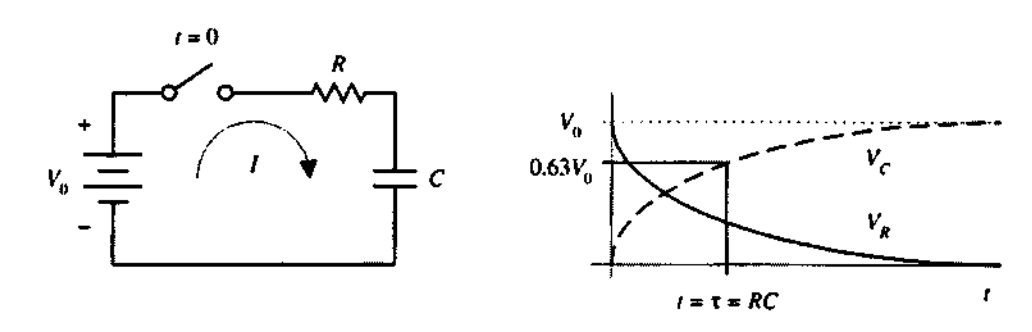
نوع الدارة	درجة الصعوبة	مستلزمات التحليل	الحالة
مصدر جهد مستمر + شبكة مقاومة	سهلة التحليل	معرفة قانون أوم وقوانين كيرشوف وبعض النظريات ومبادئ بسيطة في الجبر	تمت تغطية هذا النوع من الدارات
منبع جهد مستمر + شبكة عناصر RLC	سهلة التحليل بعض الشيء	معرفة بالمعادلات التفاضلية والتكاملية وبمبدأ العمل	سوف تُغطى لاحقاً
مصدر دوري غير جيبي وشبكة عناصر RLC	صعبة التحليل	تتطلب معرفة رياضية متقدمة كسلاسل فورييه	سوف تُغطى لاحقاً باختصار
منبع غير دوري وغير جيبي وشبكة عناصر RLC	صعبة التحليل	تتطلب معرفة رياضية متقدمة كتحليل فورييه وتحويل لابلاس	سوف تُغطى لاحقاً باختصار

18.2 دارات مصادر الجهد المستمر وRL/RC وRLC

تمت حتى الآن تغطية الدارات التي تحوي مصادر جهد مستمر ومقاومات أومية صرفة وسنتعرف الآن على دارات تحوي مصادر جهد مستمر وملفات ومكثفات.

دارات -RC

في دارة RC المبينة في الشكل (30.2) افرض أن المفتاح في الوضع الابتدائي مفتوح (Open) حتى اللحظة (to) حيث يُغلق المفتاح ويترك مغلقاً.



الشكل 30.2

بتطبيق قانون كيرشوف للجهد على الدارة نحصل على:

$$V_0 = IR + \frac{1}{C}\int I dt$$

نفاضل طرفي العلاقة فنحصل على:

$$0 = R\frac{dI}{dt} + \frac{1}{C}I \Leftrightarrow \frac{dI}{dt} + \frac{1}{RC}I = 0$$

وهذه المعادلة هي معادلة تفاضيلية متجانسة من الدرجة الأولى وحلها من الشكل:

$$I = I_0 e^{-t/RC}$$

يسمى (RC) الثابت الزمني للدارة ويرمز له بالرمز (τ)

$$\tau = RC$$

بعد أن أصبح التيار معروفاً يمكن معرفة الجهد على المقاومة والجهد على المكثف

$$V_R = IR = I_0 . R . e^{-t/RC} = V_0 e^{-t/RC}$$

$$V_C = \frac{1}{C}\int_0^t I dt = V_0 (1 - e^{-t/RC})$$

في الشكل (30.2) تُعطى أشكال الجهود (V_R) و(V_C) كتوابع للزمن ومن هذه الأشكال تلاحظ أنه عندما

$$t = \tau = RC \Rightarrow V_C = 0.632\ V_0$$

أو

$$V_C = 63.2\%\ V_0$$

دارة -RL

في الشكل 31.2 تعطى دارة RL وفي هذه الدارة يعتبر المفتاح في حالة مفتوحة (open) حتى اللحظة (t_0) وعند (t_0) يُغلق المفتاح ويبقى في حالة إغلاق وحسب قانون كيرشوف للجهد في الدارة نجد أن:

$$V_0 = IR + L.\frac{dI}{dt} \Rightarrow \frac{dI}{dt} + \frac{R}{L}I = \frac{V_0}{L}$$

وهذه المعادلة هي معادلة تفاضلية غير متجانسة من الدرجة الأولى، وحلها من الشكل:

$$I = \frac{V_0}{R}(1 - e^{\frac{Rt}{L}})$$

يسمى المقدار $\left(\frac{L}{R}\right)$ باسم الثابت الزمني RL (RL time constant)

$$\tau = \frac{L}{R}$$

وبمعرفة التيار يمكن حساب الجهد على المقاومة وكذلك الجهد على الملف بالاعتماد على قانون أوم

$$V_R = I.R = V_0(1 - e^{\frac{-Rt}{L}})$$

$$V_L = L\frac{dI}{dt} = V_0 e^{\frac{-Rt}{L}}$$

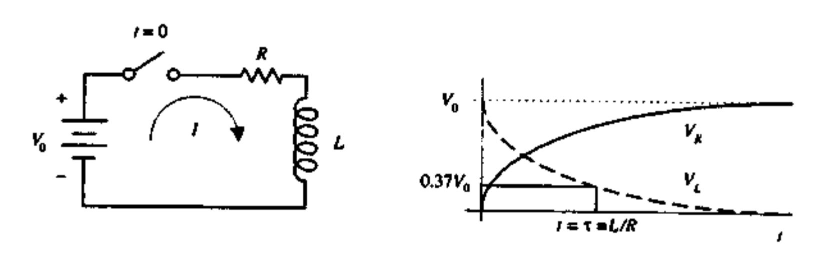
في الشكل (31.2) تُعطى أشكال الجهود (V_R) و(V_L) كتوابع للزمن ومن هذه الأشكال نلاحظ أنه عندما يكون

$$t = \tau = \frac{L}{R}$$

فإن

$$V_L = 0.37\ V_0$$

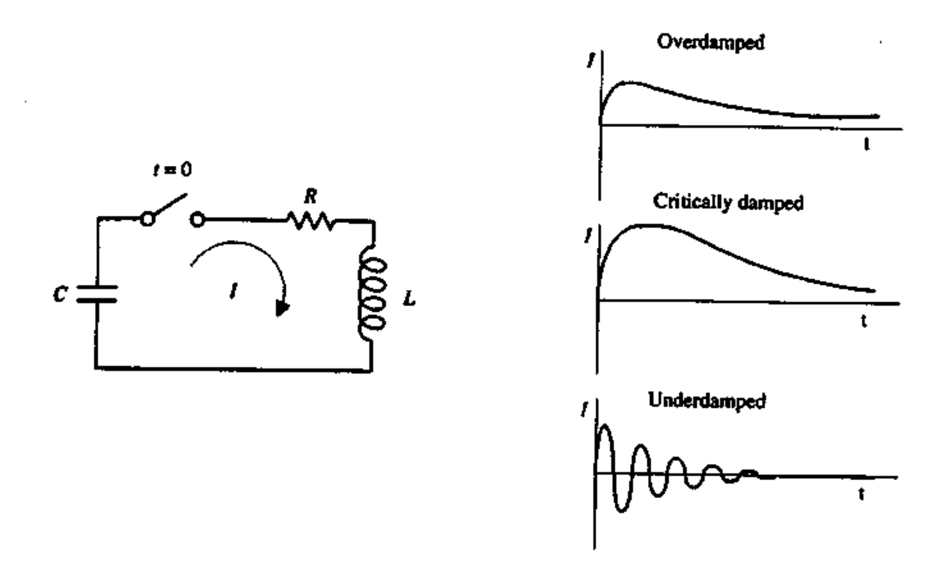
أي أن (V_L) يصل إلى ما يعادل (37%) من الجهد الأعظمي.



الشكل 31.2

دارة -RLC

في دارة الشكل (32.2) نفترض أن المكثف في الحالة الابتدائية مشحون وأن المفتاح مفتوح (open) وفي اللحظة (t = 0) يُغلق المفتاح ويبقى مغلقاً.



الشكل 32.2

بعد إغلاق المفتاح يمكن تطبيق قانون كيرشوف للجهد في الحلقة المغلقة، ونحصل بنتيجة تطبيق هذا القانون على المعادلة التالية:

$$\frac{1}{C}\int I dt + IR + L.\frac{dI}{dt} = 0$$

وهذه المعادلة يمكن كتابتها كما يلي:

$$\frac{d^2I}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC}I = 0$$

وهذه معادلة تفاضلية متجانسة من الدرجة الثانية وحلها من الشكل

$$I = \frac{V_0}{(C_1 - C_2)L}\left(e^{C_1 t} - e^{C_2 t}\right)$$

$$C_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}\,; C_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

هنا وبعكس دارات RC وRL نلاحظ أن فهم معنى الحل أكثر تعقيداً، ولهذه الدارة مجموعة من الخصائص الفريدة نلخصها فيما يلي:

- عندما يكون $R^2 > \frac{4L}{C}$ تكون الدارة في حالة تخميد عالي وباعتبار R^2 أكبر بكثير من $\frac{4L}{C}$ فإن الحل التقريبي للمعادلة سيكون.

$$I \approx \frac{V_0}{R}\left(e^{-t/RC} - e^{-Rt/L}\right)$$

- عندما يكون $R^2 = \frac{4L}{C}$ تكون الدارة في حالة تخميد حدي والحل.

$$I = \frac{V_0 t}{L} e^{\frac{-Rt}{2L}}$$

- وأخيراً إذا كان $R^2 < \frac{4L}{C}$ تكون الدارة في حالة تخميد خفيف والحل يُعطى بالمعادلة

$$I = \frac{V_0}{\omega L} e^{\frac{-Rt}{2L}} . Sin(\omega t)$$

ونلاحظ أن الحل في حالة التخميد الخفيف هو حل اهتزازي وتردد الاهتزاز $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ودور الاهتزاز $T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$، وفي هذه الحالة يحدث تبادل للطاقة بين المكثف الذي يخزن الطاقة في الحقل الكهربائي والملف الذي يخزن الطاقة في الحقل المغناطيسي، ولكن وبسبب المقاومة الأومية لأسلاك الدارة فإن الطاقة تتخامد بالتدريج (لأن الطاقة تبدَّد في المقاومة بشكلٍ حراري) ويحدث تخامد أُسي للاهتزاز. تسمى دارة RLC قليلة التخميد باسم دارة طنين (resonant circuit) وذلك بسبب سلوكها الاهتزازي (oscillatory behavior). تسمى دارة LC البسيطة التي لا تحوي مقاومة دارة طنين، ويبيّن الشكل (32.2) أشكال التيار كتابع للزمن في حالات التخميد العالي، والتخميد الحدي والتخميد الخفيف.

19.2 الأعداد العقدية

تستخدم الأعداد العقدية في تحليل الدارات الإلكترونية (والكهربائية) التي تحوي ملفات ومقاومات ومكثفات ويُطبق عليها جهود جيبيَّة، ويفيدك استخدام الأعداد العقدية في التحليل في تجنب استخدام المعادلات التفاضلية، ولذلك سنتعرف فيما يلي على الأعداد العقدية والحساب باستخدام هذه الأعداد. يتكون العدد العقدي من قسم حقيقي (Real Part) ومن قسم تخيلي (imaginary part) ويكتب العدد العقدي وفق المعادلة التالية:

$$Z = a + ib$$

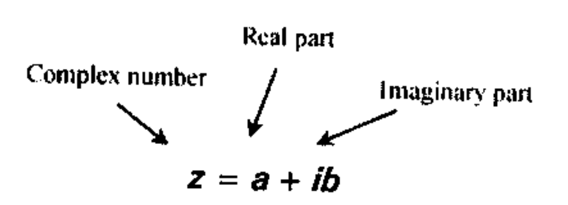
Z: العدد العقدي

a: القسم الحقيقي

ib: القسم التخيلي

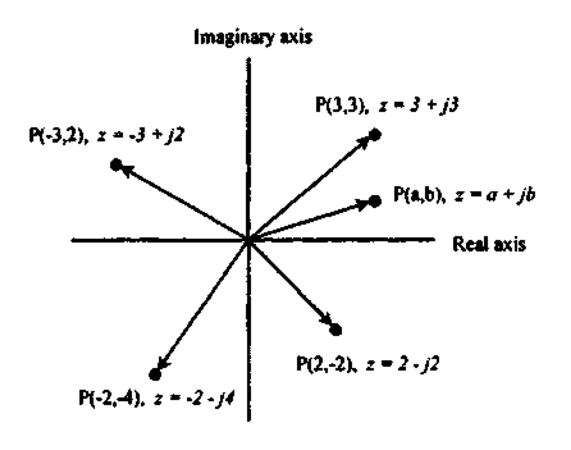
a وb هي أعداد حقيقية (real numbers) أما $i = \sqrt{-1}$ فهو الواحدة العقدية (imaginary unit)، وعند التعامل مع الأعداد العقدية في مجال الإلكترونيات ولتجنب الخلط مع رمز التيار (i) يستخدم الرمز (j) ولذلك يكتب العدد العقدي عند استخدامه في الدارات الإلكترونية بالمعادلة التالية:

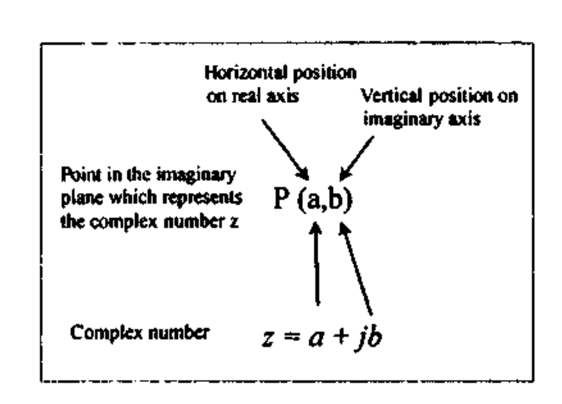
$$Z = a + jb$$



الشكل 33.2: المعادلة الأساسية للعدد العقدي

يمكن تمثيل العدد العقدي بيانياً في المستوى العقدي حيث يمثل المحور الأفقي المحور الحقيقي والمحور العمودي المحور التخيلي كما في الشكل (34.2).





الشكل 34.2

وفي هذا الشكل نلاحظ أن العدد العقدي يُمثل بنقطة في جملة إحداثيات ديكارتية P(a,b)، P هي نقطة في المستوي (جملة الإحداثيات)، (a) هو القسم الحقيقي من العدد العقدي على المحور الأفقي، (b) قسم عقدي على المحور التخيلي وطبعاً العدد العقدي هو Z = a + jb، ومن الشكل نلاحظ أن كل عدد عقدي يمثل شعاعاً يبدأ من (O) وينتهي عند (P) وهذا الشعاع له طويلة:

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}$$

ويشكل هذا الشعاع زاوية (θ) مع المحور الحقيقي الموجب:

$$\theta = \tan^{-1}\frac{b}{a}$$

ولذلك يمكن أن نكتب:

$$a = r.\cos\theta$$

$$b = r.\sin\theta$$

وفي هذه الحالة يأخذ العدد العقدي شكلاً يسمى بالشكل المثلثي (trigonometric) أو الشكل القطبي (polar)، انظر الشكل (35.2).

$$P(a,b)\ ;\ Z = r\cos\theta + j\,r\sin\theta$$

P(a,b) نقطة في جملة الإحداثيات تمثل العدد العقدي

ولكن هناك علاقة رياضية تسمى علاقة أويلر (Euler) تقول إن:

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$$

ويمكن البرهان على هذه العلاقة بنشر $e^{j\theta}$ على شكل سلسلة وكذلك نشر $j\sin\theta$ و $\cos\theta$ إلى سلاسل وبجمع سلاسل $\cos\theta$ و $j\sin\theta$ نحصل على سلسلة مساوية لسلسلة $e^{j\theta}$.

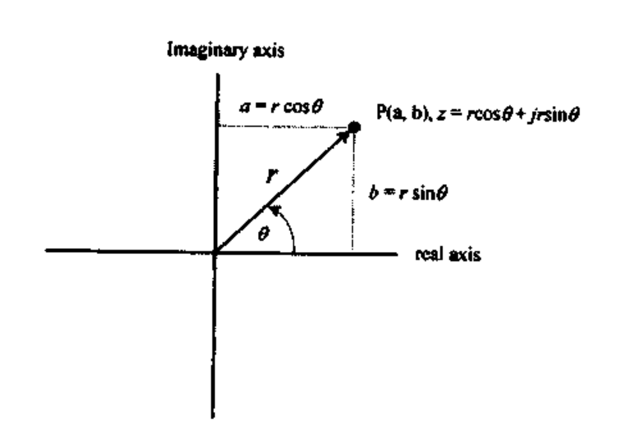
واعتماداً على علاقة أويلر يمكن كتابة العدد العقدي كما يلي:

$$Z = r\,.\,e^{j\theta}$$

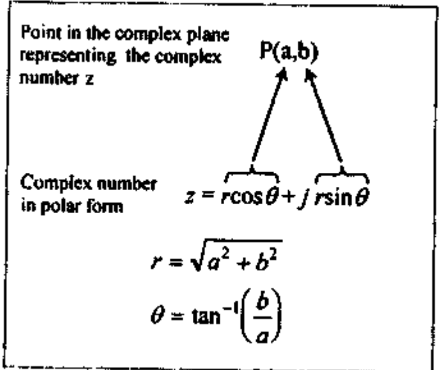
إذن يمكن تمثيل العدد العقدي أو التعبير عنه بطريقتين

$Z = a + jb = r\,(\mathrm{Cos}\,\theta + j\,\mathrm{Sin}\,\theta)$

$Z = r\,e^{j\theta}$



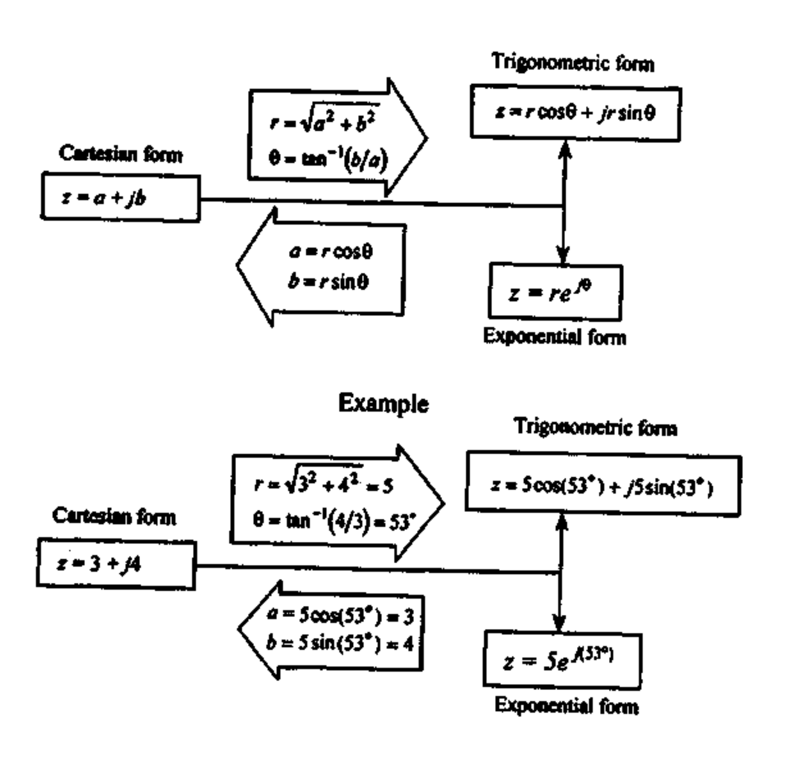




الشكل 35.2

وكل شكل من هذه الأشكال مناسب ومستحسن للاستخدام في بعض الحسابات وذلك حسب الحالة والمسألة ويترك استخدام أحد هذه الأشكال للخبرة وللتسهيلات التي يقدمها لمن يتعامل مع الدارة الإلكترونية.

يبيِّن الشكل (36.2) العلاقات بين الأشكال المختلفة للعدد العقدي.



الشكل 36.2

يبيّن الجدول 2.2 قواعد الحساب باستخدام الأعداد العقدية

القسمة	الضرب	الجمع/الطرح	شكل العدد العقدي
$\frac{Z_1}{Z_2} =$ $\frac{ac+bd}{c^2+d^2} + j$ $\left(\frac{bc-ad}{c^2+d^2}\right)$ مثال $Z_1 = 1 + j$ $Z_2 = 3 + 2j$ $\frac{Z_1}{Z_2} =$ $\frac{1(3)+(1)2}{3^2+2^2} +$ $j\left(\frac{1(3)-1(2)}{3^2+2^2}\right)$ $= \frac{5}{13} + j\frac{1}{15}$	$Z.Z_2 =$ $(ac - bd) + j\,(ad - bc)$ مثال $Z_1 = 5 + j2$ $Z_2 = -4 + j3$ $Z_1\,Z_2 =$ $[5(-4) - 2(3)] +$ $j\,[5\,(3) + 2(-4)]$ $= -26 + j7$	$Z_1 + Z_2 =$ $(a \pm c) + j\,(b \pm d)$ مثال $Z_1 = 3 + j4$ $Z_2 = 5 - j7$ $Z_1 + Z_2 = (3 + 5) + j(4-7)$ $= 8 - j3$	$Z_1 = a + jb$ $Z_2 = c + jd$ (الشكل الديكارتي)
هنا أيضاً يمكن إجراء القسمة ولكن يحتاج إنجاز العملية إلى معرفة بقوانين علم المثلثات وينصح بتحويل الأعداد إلى الشكل الأسي وإنجاز القسمة	يمكن إجراء الجمع والطرح ولكن إنجاز العملية يحتاج أيضاً إلى معرفة جيدة بعلم وقوانين المثلثات. ينصح بتحويل الأعداد إلى الشكل الأسي وإنجاز الضرب	من الممكن إجراء الجمع والطرح ولكن إتمام العمليات يحتاج إلى معرفة بقواعد المثلثات ولذلك ينصح بتحويل الأعداد من هذا الشكل إلى الشكل الديكارتي وإجراء عمليات الجمع والطرح	$Z_1 = \cos\theta_1 + j\sin\theta_1$ $Z_2 = \cos\theta_2 + j\sin\theta_2$ شكل قطبي (مثلثي)
$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{r_1}{r_2} e^{j(\theta_1-\theta_2)}$ مثال $Z_1 = 8e^{j\pi}$ $Z_2 = 2e^{j\frac{\pi}{3}}$ $\frac{Z_1}{Z_2} = 4e^{j\frac{2\pi}{3}}$	$Z_1\,Z_2 =$ $r_1\,r_2\,e^{j(\theta_1+\theta_2)}$ مثال $Z_1 = 5e^{j\pi}$ $Z_2 = 2e^{j\frac{\pi}{2}}$ $Z_1Z_2 = 10e^{j\left(\frac{3\pi}{2}\right)}$	هنا أيضاً من الأسهل تحويل الأعداد إلى الشكل الديكارتي وإنجاز عمليات الجمع والطرح	$Z_1 = r_1e^{j\theta_1}$ $Z_2 = r_1e^{j\theta_2}$ شكل قطبي أسي

وفيما يلي بعض العلاقات الهامة التي يجب أن تعرفها

$$j = \sqrt{-1};\ j^2 = -1,\ \frac{1}{j} = -j$$

$$e^{j\frac{\pi}{2}} = j;\ e^{j\pi} = -1,\ e^{j\frac{3\pi}{2}} = -j;\ e^{j2\pi} = 1$$

$$\frac{1}{a+jb} = \frac{a-jb}{a^2+b^2}$$

20.2 الدارات ذات المنابع الجيبيّة

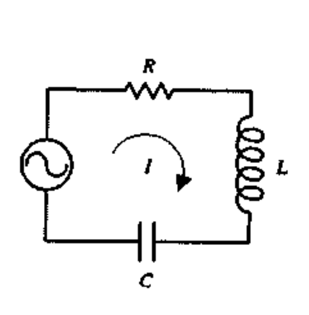
افرض أنك أُعطيت الدارتين التاليتين (الشكل 37.2) وأن عناصر هذه الدارات هي مقاومات، وملفات ومكثفات ويُطبق على الدارات جهود جيبيَّة. لتحليل الدارة البسيطة منهما عليك تطبيق قانون كيرشوف للجهد

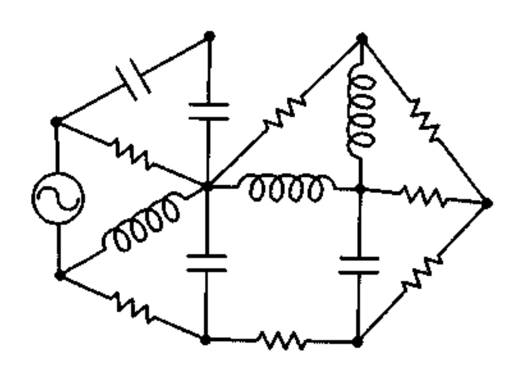
$$V_0 Cos(\omega t) = IR + L.\frac{dI}{dt} + \frac{1}{C}\int I\,dt$$

وهذه المعادلة يمكن كتابتها بالشكل التالي:

$$L.\frac{d^2I}{dt^2} + R.\frac{dI}{dt} + \frac{1}{C}I = -\omega V_0\ Sin(\omega t)$$

وهذه المعادلة تفاضلية غير متجانسة من الدرجة الثانية ويمكن حلِ هذه المعادلة باستخدام إحدى الطرق المعروفة في حل المعادلات التفاضلية من هذا النوع كطريقة تغيير المتحولات مثلاً، وبعد حل المعادلة يصبح التيار معطى بمعادلة معلومة، ولإيجاد هبوط الجهد على كل عنصر عليك استخدام قانون أوم، ولكن حل المعادلة التفاضلية الأخيرة للحصول على معادلة التيار ليس أمراً سهلاً ويتطلب معرفة عميقة بالرياضيات وبالتحديد بطرق حل المعادلات التفاضلية.





الشكل 37.2

على الرغم من صعوبة حل المعادلة التفاضلية إلا أن الأمر ما يزال يبدو في حدود المعقول، ولكن إذا أردت تحليل الدارة الثانية في الشكل 37.2 وهي دارة معقّدة مقارنة مع الدارة الأولى، عليك استخدام قانون كيرشوف للجهد في عدة حلقات وكذلك قوانين كيرشوف للتيارات في عدد من العقد، وفي هذه الحالة ستحصل على جملة معادلات تفاضلية وهنا يصبح حل هذه المعادلات أكثر تعقيداً من الحالة السابقة. ذكرنا لك كل ذلك كي تدرك حجم وصعوبة المسألة عند الرغبة في حلها بالطرق المعروفة لديك حتى الآن، ولكن لا تتشاءم فسنعرِّفك الآن على طريقة جديدة في التحليل تغنيك نهائياً عن المعادلات التفاضلية وفي هذه الطريقة يتم استخدام الممانعات العقدية (Complex Impedances).

21.2 تحليل الدارات الجيبيّة باستخدام الممانعات العقدية

من الممكن من أجل تسهيل عملية تحليل الدارات الجيبيّة استخدام طريقة يُعتبر فيها كل من الملف أو المكثف ممانعات عقديّة، ويمكن عندها تحليل أية دارة تحوي ملفات ومكثفات ومقاومات بنفس الأسلوب المعتمد في تحليل دارات المقاومات ويمكن تطبيق كافة القوانين السابقة في تحليل هذه الدارات. فيما يلي ستتعرف على المبادئ النظرية لاستخدام الممانعات العقدية في التحليل. في دارة يُطبق عليها جهد جيبي سوف تكون كافة الجهود والتيارات جيبيَّة، أي تيارات أو جهود متغيرة مع الزمن ولها نفس التردد والذي هو أيضاً تردد مصدر الجهد الأساسي، أما صفحات الجهود والتيارات في

الدارة فسوف تكون مزاحة بالمقارنة مع صفحة المصدر الأساسي وذلك بسبب تأثير المكثفات والملفات الموجودة في الدارة. إذا كان في الدارة أكثر من مصدر للجهد، يمكن استخدام نظرية التنضد (superposition theorem)، وملخص هذه النظرية أن التيار الذي يمر في فرع من دارة تحوي أكثر من مصدر للجهد هو مجموع التيارات الناتجة عن كل مصدر بمفرده، أي توجد التيار الناتج في الفرع بتأثير المصدر الأول وفي هذه الحالة نعتبر كافة المصادر الأخرى مقصورة، ثم توجد التيار الناتج بتأثير المصدر الثاني باعتبار كافة المصادر الأخرى مقصورة وهكذا حتى الانتهاء من كافة المصادر ونجمع هذه التيارات جبرياً فنحصل على التيار الكلي في الفرع، والبرهان على صحة هذه النظرية يأتي من حقيقة أن تطبيق قوانين كيرشوف على دارة خطية يؤدي إلى الحصول على مجموعة من المعادلات الخطية وهذه المعادلات يمكن أن تختزل إلى معادلة خطية واحدة بمجهول واحد، وبذلك فإن تيار الفرع المطلوب معرفته يمكن كتابته كمجموع خطي للتيارات الناتجة عن تأثير المصادر، وميزة الحل باستخدام الممانعات العقدية هي التخلص من ضرورة إيجاد المعادلة الزمنية للتيار أو الجهد في الدارة لأن كل التيارات والجهود تكون من الشكل $Cos(\omega t + \phi)$ وكل ما عليك فعله هو حساب القيمة العظمى (peak value) للجهد أو التيار وكذلك الصفحة، وتطبيق نظرية التنضد ويمكن طبعاً استخدام توابع الجيب (Sin) أو التجيب (Cos) للتعبير عن الجهود والتيارات. ستواجه بعض الصعوبات في عمليات الجمع والطرح والضرب، لأنك سوف تتعامل مع تعابير (Sin) أو (Cos) وجمع وطرح هذه التعابير أو الحدود يتطلب معرفة بقوانين المثلثات وكذلك تحويل الناتج إلى شكل يسهل فهمه. والآن نناقش التساؤل: ما الذي عليك فعله للتعبير عن مطالات وصفحات التيارات والجهود في دارة كي تستخدم الأعداد العقديّة؟ تذكر من فقرة الأعداد العقدية أن للعدد العقدي طبيعة جيبيّة، على الأقل في المستوى العقدي، كمثال الشكل المثلثي للعدد العقدي $[Z = r\ Cos\ \theta + j\ r\ Sin\ \theta]$ هذا العدد سوف يرسم مساراً دائرياً في المستوي العقدي عندما تتغيّر (θ) من (0) وحتى ($360°$) أو (صفر) إلى (2π) راديان. إذا رسمت القسم الحقيقي من العدد العقدي (Z) كتابع لـــ (θ) سوف تحصل على موجة جيبيّة، ومن أجل تغيير مطال هذه الموجة، عليك تغيير قيمة (r) ومن أجل الحصول على التردد المطلوب عليك ضرب (θ) برقمٍ ما.

ولكي تحصل على إزاحة صفحية عليك إضافة قيمة ما مقدرة بالدرجة أو الراديان إلى θ. الآن عندما تستبدل (θ) بـــ (ωt) استبدل (r) بـــ (V_0) واترك في المعادلة مجالاً لإضافة ما يعبّر عن إزاحة الصفحة وبذلك تحصل على علاقة للجهد بدلالة العدد العقدي، ويمكنك فعل نفس الشيء بالنسبة للتيار. الشيء الجيد في العدد العقدي مقارنة مع التوابع الجيبيّة هو إمكانية التعبير عن العدد العقدي بثلاث طرق مختلفة وهي إما الشكل الديكارتي، أو الشكل المثلثي أو الشكل الأُسي ويمكنك اختيار الشكل المناسب من هذه الأشكال بحيث يسهل العمليات الرياضية التي تريد إجراءها على العدد فمثلا يعتبر الشكل الديكارتي مناسباً جداً لعمليات الجمع والطرح، والشكل الأسي مناسب أكثر من غيره وأسهل لعمليات الضرب والقسمة. تجدر الإشارة هنا إلى أن التيارات والجهود هي في الواقع حقيقية ولا يوجد شيء اسمه تيار أو جهد تخيلي والقسم التخيلي الذي يظهر في قيمة الجهد أو التيار هو عبارة عن وسيلة للتعبير عن صفحة (Phase) الجهد أو التيار. الآن وبعد كل هذا الكلام سوف نبدأ بالتطبيق الذي يوضح لك كل الأفكار التي مرت عليك في هذا الشرح.

لتكن لدينا المعادلة التالية لجهد جيبي:

$$v = V_0\ Cos\ (\omega t)$$

نحول هذا الجهد إلى الشكل العقدي:

$$v = V_0\ Cos\ (\omega t) + j\ V_0\ Sin\ (\omega t)$$

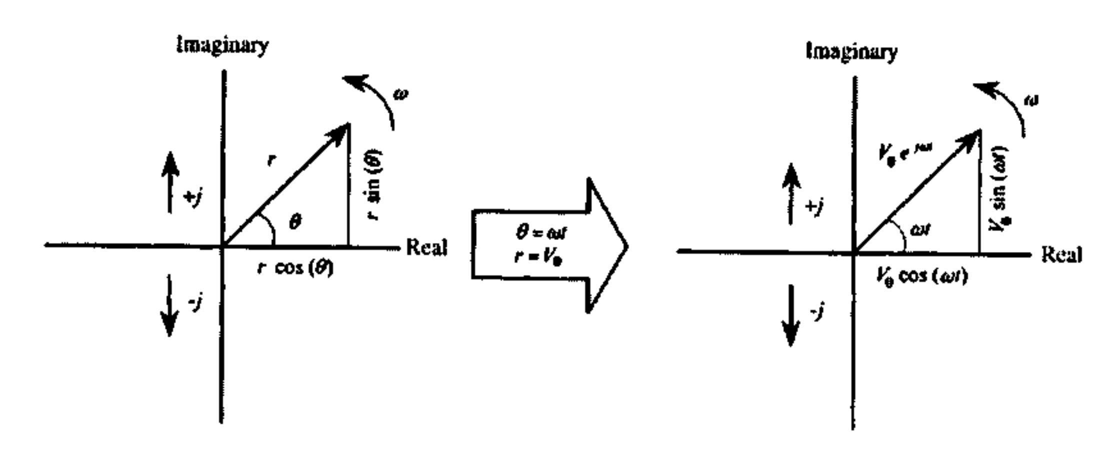
الحد $j\ V_0\ Sin\ (\omega t)$ هو مقدار عقدي وليس له أي معنى فيزيائي ولا يؤثر على القيمة الحقيقية للجهد. من أجل تبسيط الحسابات تحول الشكل المثلثي العقدي للجهد إلى الشكل الأُسي بالاعتماد على علاقة أويلر:

$$r\ Cos\ \theta + j\ r\ Sin\ \theta = r\ e^{j\theta}$$

وبالتالي فإن الجهد يكتب بالعلاقة:

$$v = V_0\ .\ e^{j\omega t}$$

يمكن بيانياً تمثيل الجهد كشعاع يدور بعكس عقارب الساعة بتردد زاوي يساوي (ω) طبعاً في المستوي العقدي. طويلة الشعاع تساوي القيمة العظمى للجهد أي تساوي (V_0)، ويمثل مسقط الشعاع على المحور الأفقي المركبة الحقيقية للجهد، أما الإسقاط على المحور العمودي فيمثل القسم التخيلي للجهد، كما في الشكل (38.2).



الشكل 38.2

الآن وبعد أن تم التعبير عن منبع الجهد بالشكل العقدي يمكن وصل مقاومة أو مكثف أو ملف مع المنبع وإيجاد العلاقة العقدية للتيار في كل عنصر كما في الشكل (39.2). في الدارة التي تحوي مقاومة نجد أن

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_0 e^{j\omega t}}{R} = \frac{V_0}{R} e^{j\omega t}$$

أما في الدارة التي تحوي مكثف

$$I = C\frac{dv}{dt} = j\omega C V_0 e^{j\omega t}$$

أما في الملف

$$I = \frac{1}{L}\int v\,dt = \frac{1}{L}\int V_0 e^{j\omega t} = \frac{V_0 e^{j\omega t}}{j\omega L}$$

بمقارنة فروقات الصفحة بين الجهد والتيار في كل دارة من الدارات الثلاثة المعطاة في الشكل (39.2) نلاحظ ما يلي:

- لا يوجد فرق صفحة بين تيار المقاومة وهبوط الجهد عليها.
- يوجد فرق صفحة مقداره 90° بين الجهد والتيار في الملف والجهد في الملف يتقدم على التيار بزاوية 90° أو التيار يتأخر عن الجهد بزاوية 90° أو $\left(\frac{\pi}{2}\right)$ راديان.
- يوجد فرق صفحة قدره (90°) أو $\left(\frac{\pi}{2}\right)$ راديان بين الجهد والتيار في المكثف فتيار المكثف يتقدم على جهد المكثف بزاوية (90°) أو الجهد يتأخر عن التيار بزاوية (90°).

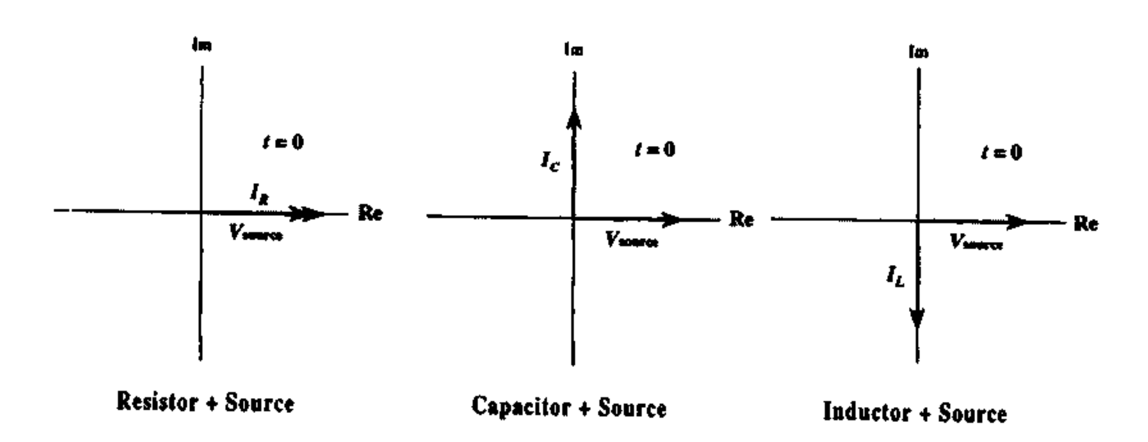
وهذا يتطابق مع ما تعلمناه سابقاً عن المفاعلات. يمكن توضيح العلاقة الصفحية بين الجهد والتيار في الدارات الثلاثة بيانياً بواسطة مخطط يسمى مخطط صفحي (phasor diagram) وهو عبارة عن مخطط في المستوي العقدي يمثل قيم الجهد والتيارات عند زمن محدّد، فمثلاً عند اعتبار $t = 0$ في معادلات التيارات السابقة نحصل على المخطط الصفحي التالي المعطى في الشكل (40.2).

$V = V_0 e^{j\omega t}$ — I_R — R — Resistor: $I_R = \frac{V}{R} = \frac{V_0}{R} e^{j\omega t}$

$V = V_0 e^{j\omega t}$ — I_C — C — Capacitor: $I_C = C\frac{dV}{dt} = j\omega C V_0 e^{j\omega t}$

$V = V_0 e^{j\omega t}$ — I_L — L — Inductor: $I_L = \frac{1}{L}\int V dt = \frac{V_0}{j\omega L} e^{j\omega t}$

الشكل 39.2



الشكل 40.2

فرق الصفحة بين الجهد والتيار هو الزاوية بينهما على المخطط الصفحي إذا قسمنا الجهد على كل عنصر على تيار ذلك العنصر يُختصر الحد ($e^{j\omega t}$) ونحصل على ثلاث علاقات هي:

$$Z_R = \frac{V_0 e^{j\omega t}}{\frac{V_0}{R} e^{j\omega t}} = R$$

$$Z_C = \frac{v}{I_C} = \frac{V_0 e^{j\omega t}}{j\omega C V_0 e^{j\omega t}} = \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z_L = \frac{V_0 e^{j\omega t}}{\frac{V_0}{j\omega L} . e^{j\omega t}} = j\omega L$$

$$Z_R = \frac{V_0 e^{j\omega t}}{\frac{V_0}{R} e^{j\omega t}} = R$$

$$Z_C = \frac{V}{I_C} = \frac{V_0 e^{j\omega t}}{j\omega C V_0 e^{j\omega t}} = \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z_L = \frac{V}{I_L} = \frac{V_0 e^{j\omega t}}{\frac{V_0}{j\omega L} e^{j\omega t}} = j\omega L$$

الشكل 41.2

لاحظ من المعادلات الثلاثة للممانعات أنّ ممانعة المقاومة هي مقاومة أومية صرفة، وأن ممانعة المكثف تشبه علاقة المفاعلة ولكن مع وجود (j) أي أن ممانعة المكثف عقدية وكذلك الأمر بالنسبة لممانعة الملف. من معادلات الممانعات تجد أن ممانعة الملف تتعلق بالتردد وليس لها علاقة بالزمن وكذلك الأمر فإن ممانعة المكثف تتعلق بالتردد وليس لها علاقة بالزمن. الشيء الرائع هو أنك أصبحت قادراً على التعبير عن I و V و Z بشكل عقدي ويمكن استخدام ذلك في كل القوانين وسوف تلاحظ أن ذلك يسهل عليك عملية التحليل، إذ لا ضرورة أبداً للتفكير بالعلاقات الزمنية، لأن الحسابات العقدية سوف تعطيك قيم المطالات (القيم العظمى) للجهود والتيارات وكذلك إزاحاتها الصفحية. طبعاً عند استخدام الأشكال العقدية للتيار (I) وللجهد (V) وللممانعة (Z) في العلاقات المستخدمة في التحليل كقانون أوم وقوانين كيرشوف فإنك سوف تتعامل مع معادلات تحوي حدوداً وأعداداً عقدية، فمثلاً يصبح قانون أوم بالشكل التالي:

$$v(t) = I(t) \,.\, Z$$

ويمكن إجراء مراجعة على القوانين الأساسية التي تعرفنا عليها في دارات التيار المستمر بهدف إعادة صياغة هذه القوانين لدارات التيار المتناوب التي أدخلنا مفهوم الممانعات العقدية إليها.

22.2 الممانعات الموصولة على التسلسل ومقسم الجهد

في الشكل (42.2) توصل الممانعات (Z_1) و(Z_2) على التسلسل، والتيار التسلسلي المار في هذه الممانعات هو $i(t)$ والجهد المطبق على الدارة $v_{in}(t)$

$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2$$

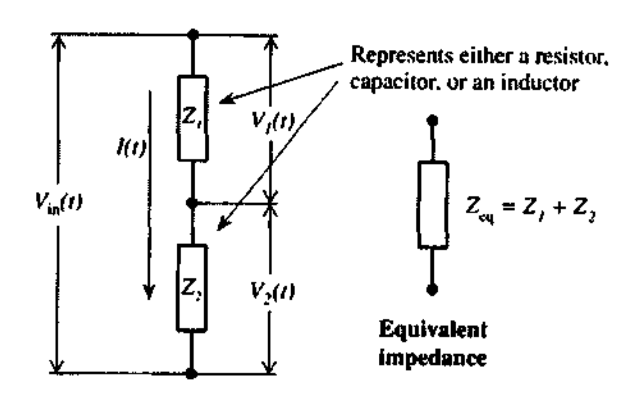
$$i(t) = \frac{v_{in}(t)}{Z_{eq}}$$

$$v_1(t) = \frac{v_{in}(t).Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

$$v_2(t) = \frac{v_{in}(t).Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

وعند وصل عدد أكبر من الممانعات على التسلسل، فإن الممانعة المكافئة ستكون

$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2 + \ldots\ldots\ldots\ldots + Z_n$$



الشكل 42.2

23.2 وصل الممانعات على التوازي ومقسم التيار

يُطبق في الشكل 43.2 منبع جهد $v_{in}(t)$ على ممانعتين (Z_1) و(Z_2) موصولتين على التوازي فيمر في كل ممانعة تيار $i_1(t)$ في Z_1 و$i_2(t)$ في Z_2 ومجموع هذين التيارين:

$$i_1(t) + i_2(t) = i_{in}(t)$$

$$Z_{eq} = \frac{Z_1.Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

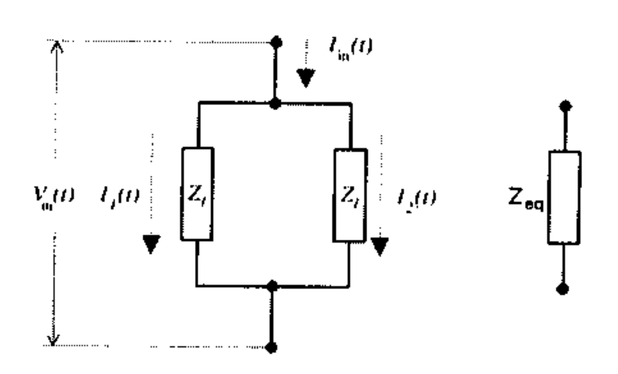
$$i_{in} = \frac{v_{in}(t)}{Z_{eq}}$$

$$i_1(t) = i_{in}(t).\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$i_2(t) = i_{in}(t).\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

عند وصل أكثر من ممانعتين على التوازي تعطى الممانعة المكافئة بالعلاقة:

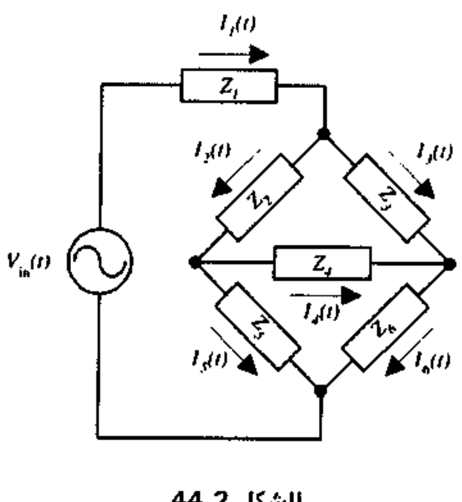
$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots\dots\dots\dots + \frac{1}{Z_n}$$



الشكل 43.2

24.2 تطبيق قوانين كيرشوف في دارات التيار المتناوب

لتكن لدينا الدارة المبينة في الشكل (44.2) وسنكتب قوانين كيرشوف للتيارات والجهود في عقد وحلقات هذه الدارة.



الشكل 44.2

قوانين كيرشوف للتيارات في العقد:

$$i_1(t) = i_2(t) + i_3(t)$$
$$i_2(t) = i_5(t) + i_4(t)$$
$$i_6(t) = i_4(t) + i_3(t)$$

قوانين كيرشوف للجهد في حلقات الدارة:

$$v_{in}(t) - i_1(t)\,Z_1 - i_2(t)\,Z_2 - i_5(t)\,Z_5 = 0$$
$$-i_3(t)\,Z_3 + i_4(t)\,Z_4 + i_2(t)\,Z_2 = 0$$
$$-i_6(t)\,Z_6 + i_5(t)\,Z_5 + i_4(t)\,Z_4 = 0$$

بعض المسائل Problems

إن عملية تحليل الدارات المتناوبة التي تحوي ملفات ومقاومات ومكثفات سهلة وتتطلب اتقان العمليات الحسابية على الأعداد العقدية وكذلك اتقان تطبيق قوانين تحليل الدارات (قوانين كيرشوف وقانون أوم).

وفيما يلي بعض الأمثلة التي توضح ذلك.

مثال (1): مقاومة ومكثف على التسلسل

في الشكل (45.2) تعطى دارة تسلسلية مكونة من مقاومة ومكثف ويطلب إيجاد الممانعة المكافئة والتعبير عنها بالأشكال الثلاثة الديكارتي والمثلثي والأسي.

R

C

الشكل 45.2

الحل:

$$Z_{eq} = Z_R + Z_C = R + \frac{1}{j\omega c}$$

$$Z_{eq} = R - j\frac{1}{\omega c}$$

وهذا الشكل هو الشكل الديكارتي للممانعة. نوجد الآن الشكل الأُسي ($r\, e^{j\theta}$) ومن أجل ذلك نوجد طويلة وزاوية العدد العقدي:

$$r = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega c}\right)^2} = |Z|$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) = \tan^{-1}\frac{\frac{1}{\omega c}}{R} = \tan^{-1}\frac{1}{\omega RC} \Rightarrow$$

$$Z_{eq} = \left[R^2 + \left(\frac{1}{\omega c}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} . e^{j\left[\tan^{-1}\frac{1}{\omega RC}\right]}$$

فإذا كانت $R = 150\ \Omega$، $C = 0.1\ \mu F$ و $\omega = 10^4\ rad/s$ فإن القيمة العددية للمانعة ستكون:

الشكل الديكارتي

$Z_{eq} = (150 - j500)\ \Omega$;

الشكل القطبي

$Z_{eq} = (2504\ \Omega)\ e^{j(-86.5°)}$

أما **الشكل المثلثي** فسوف يكون:

$Z_{eq} = (2504\ \Omega) \cos(-86.5°) + j\,(2504\ \Omega) \sin(-86.5°)$

إذا تم وصل منبع جهد ($V_0\, e^{j\omega t}$) مع الدارة التسلسلية المدروسة هنا عندها يمكن إيجاد التيار من العلاقة

$$i(t) = \frac{V_0 e^{j\omega t}}{|Z| e^{j\theta}}$$

أما الجهود على R والمكثف فنوجدها من العلاقات:

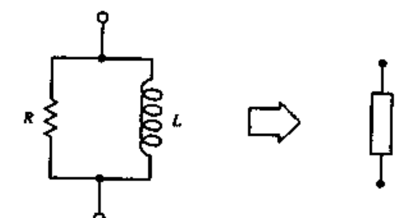
$$V_R(t) = \frac{Z_R}{Z_R + Z_C} V_0 e^{j\omega t} = \frac{R}{Z_{eq}} . V_0 . e^{j\omega t}$$

$$v_c(t) = \frac{Z_C}{Z_R + Z_C} V_0 . e^{j\omega t} = \left(\frac{1/j\omega c}{Z_{eq}}\right) V_0 . e^{j\omega t}$$

بعد إيجاد $V_R(t)$ و $V_C(t)$ يجب إزالة القسم التخيلي من النتيجة وذلك بإلغائه ببساطة من النتيجة.

مثال (2): مقاومة وملف على التوازي

في الشكل (46.2) تُعطى دارة فيها ملف موصول على التوازي مع مقاومة والمطلوب إيجاد الممانعة المكافئة وكتابة هذه الممانعة بالأشكال العقدية الثلاثة الديكارتي، والمثلثي والأُسي.



الشكل 46.2

الحل:

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_L} \Rightarrow$$

$$Z_{eq} = \frac{R.j\omega L}{R + j\omega L} = \frac{j\omega LR[R - j\omega L]}{R^2 + (\omega L)^2} \Rightarrow$$

$$Z_{eq} = \frac{j\omega LR^2 + (\omega L)^2 R}{R^2 + (\omega L)^2} \Rightarrow$$

$$Z_{eq} = \frac{(\omega L)^2 R}{R^2 + (\omega L)^2} + j\frac{R^2 \omega L}{R^2 + (\omega L)^2} = a + jb$$

وهذا الشكل هو الشكل الديكارتي وللحصول على الشكل الأُسي نوجد

$$r = [(a)^2 + (b)^2]^{1/2} = \left\{\frac{R^2(\omega L)^4 + R^4(\omega L)^2}{[R^2 + (\omega L)^2]^2}\right\}^{1/2} \Rightarrow$$

$$r = \frac{R\omega L}{[R^2 + (\omega L)^2]^{1/2}}; \theta = \tan^{-1}\left(\frac{R^2 \omega L}{R(\omega L)^2}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{R}{\omega L}\right) \Rightarrow$$

$$Z_{eq} = \frac{R_{\omega L}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} e^{j\left[\tan^{-1}\left(\frac{R}{\omega L}\right)\right]}$$

الآن إذا كانت $R = 150\ \Omega$، $L = 50\ mH$ و$\omega = 4 \times 10^3$ فإن القيم العددية للمكثف تصبح كما يلي:

$$Z_{eq} = (96 + j72)\ \Omega$$
$$Z_{eq} = 120\ e^{j(36.9^\circ)}$$
$$Z_{eq} = (120\ \Omega)\ Cos(36.9^\circ) + j\ (120\ \Omega)\ Sin(36.9^\circ)$$

إذا طُبق جهد ($V_0\ e^{j\omega t}$) على الدارة التفرعية يمكن إيجاد التيارات في الفروع باستخدام العلاقات التالية:

$$I_{in}(t) = \frac{v_{in}(t)}{Z_{eq}} = \frac{V_0 e^{j\omega t}}{Z_{eq}}$$

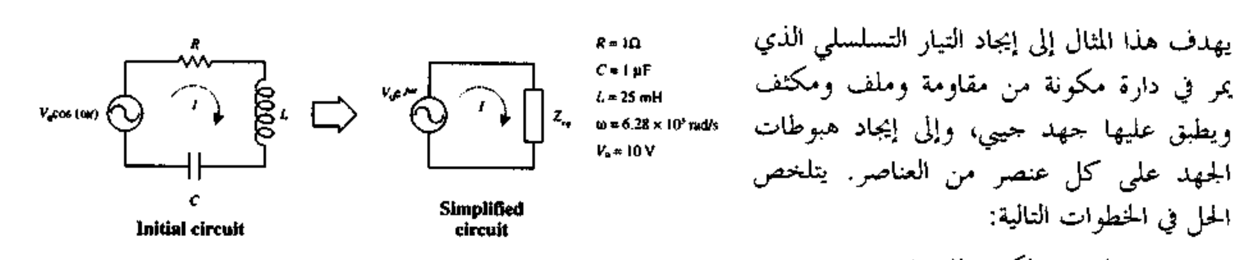
$$I_R(t) = I_{in}(t)\left(\frac{Z_L}{Z_R + Z_L}\right) = I_{in}(t).\frac{j\omega L}{Z_{eq}}$$

$$I_L(t) = I_{in}(t).\frac{Z_R}{Z_R + Z_L} = I_{in}(t).\frac{R}{Z_{eq}}$$

بعد إيجاد القيم العددية للتيارات تحذف منها الأجزاء العقدية ويكون القسم الحقيقي هو تيار الفرع المطلوب.

مثال (3):

يهدف هذا المثال إلى إيجاد التيار التسلسلي الذي يمر في دارة مكونة من مقاومة وملف ومكثف ويطبق عليها جهد جيبي، وإلى إيجاد هبوطات الجهد على كل عنصر من العناصر. يتلخص الحل في الخطوات التالية:



الشكل 47.2

1. إيجاد الممانعة المكافئة للدارة.

2. إيجاد التيار $i(t) = \frac{v(t)}{Z_{eq}}$
3. استخدام قانون أوم لحساب هبوط الجهد على كل عنصر.

الحل:

$$Z_{eq} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega c} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega c}\right)$$

وبتعويض القيم العددية نحصل على

$$Z_{eq} = 1\ \Omega - j\ 2.08\ \Omega$$

من المفيد هنا تحويل الممانعة إلى الشكل الأسي

$$r = \sqrt{(a)^2 + (b)^2} = \sqrt{(1)^2 + (-2.08)^2} = 2.30\Omega$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2.08}{1}\right) = -64.3^\circ \Rightarrow$$

$$Z_{eq} = r\,e^{j\theta} = (2.30\Omega)e^{j(-64.3^\circ)}$$

لإيجاد $i(t)$ نقسم الجهد $V_0\,e^{j\omega t}$ على الممانعة المكافئة

$$i(t) = \frac{V_0 e^{j\omega t}}{r\,e^{j\theta}} = \frac{V_0}{r}e^{j(\omega t-\theta)} = \frac{10}{2.30}e^{j(\omega t+64.3^\circ)} = (4.34A)e^{j(\omega t+64.3)}$$

من أجل إيجاد $V_R(t)$، $V_L(t)$ و$V_C(t)$ يتم استخدام قانون أوم

$$V_R(t) = R\,.\,i(t) = (1\ \Omega)\ (4.34\ A)\ e^{j(\omega t + 64.3)} = (4.34\ V)\ e^{j(\omega t + 64.3)}$$

$$V_L(t) = (j\omega L)\,.\,i(t) = j(4.34\ A)\ (157.1\ \Omega)\ e^{j(\omega t + 64.3)} = (682\ V)\ e^{j(\omega t + 64.3 + 90^\circ)}$$

وهنا في هذه الخطوة تم تحويل $j(4.34)$ إلى الشكل الأُسي

$$r = \sqrt{(0)^2 + (4.34)^A} = (4.34)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{4.34}{0}\right) = \tan^{-1}(\infty) = 90^\circ \Rightarrow$$

$$j(4.34A) = (4.34)e^{j90^\circ}$$

إذن

$$V_L(t) = (682V).e^{j(\omega t+154.3^\circ)}$$

$$V_C(t) = \left(\frac{1}{j\omega c}\right)i(t) = \frac{1}{j}(159.2\Omega)(4.34A)e^{j(\omega t+64.3^\circ)}$$

$$V_C(t) = (691V)e^{j(\omega t+64.3-90)}$$

$$= (691V).e^{j(\omega t-25.7^\circ)}$$

وهنا أيضاً قمنا بتحويل $\frac{1}{j159.2}$ إلى الشكل الأسي وطبعاً هنا يمكننا كتابة $\frac{1}{j} = -j$

$$r = \sqrt{(0)^2 + (-159.2\Omega)^2} = 159.2\Omega$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{-159.2}{0}\right) = \tan^{-1}(-\infty) = -90^\circ$$

$$\frac{1}{j}(159.2\Omega) = (159.2\Omega)e^{j(-90^\circ)}$$

هنا أيضاً نذكر أن $i(t)$، $V_R(t)$، $V_C(t)$ و$V_L(t)$ يجب أن تكون حقيقية، ولجعل النتائج حقيقية يجب إلغاء الأقسام التخيلية والنتيجة النهائية تصبح:

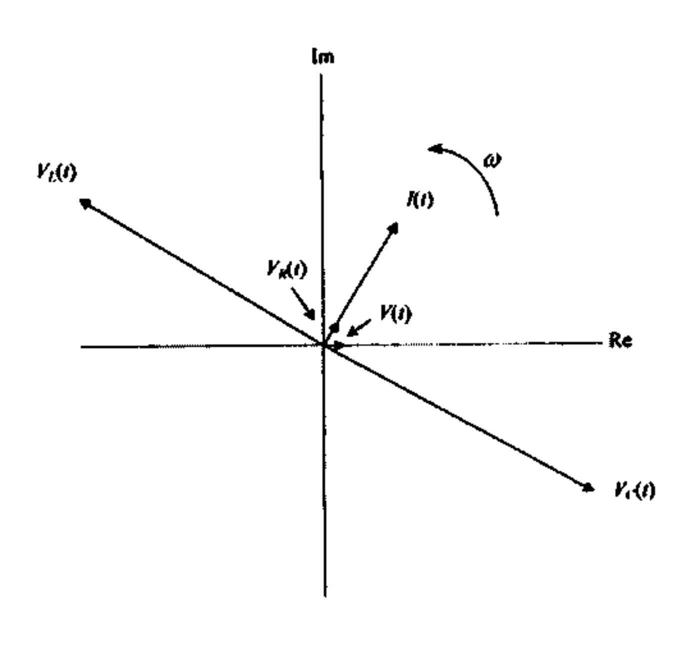
$$i(t) = (4.34\ A)\ e^{j(\omega t + 64.3^\circ)} = (4.34\ A)\ .\ Cos(\omega t + 64.3^\circ) = (4.34\ A)\ Cos(6.28 \times 10^3 t + 64.3^\circ)$$

$$V_R(t) = (4.34\ V)\ Cos(\omega t + 64.3) = (4.34\ V)\ Cos(6.28 \times 10^3 t + 64.3^\circ)$$

$$V_L(t) = (628\ V)\ Sin\ (\omega t + 154.3^\circ) = (628\ V)\ Sin(6.28 \times 10^3 t + 154.3^\circ)$$

$$V_C(t) = (691\ V)\ Sin(\omega t - 25.7^\circ) = (691\ V)\ Sin(6.28 \times 10^3 t - 25.7^\circ)$$

يبيِّن الشكل (48.2) مقارنة بين مطالات وصفحات $V_R(t)$، $V_C(t)$، $V_L(t)$ و$i(t)$ بالمقارنة مع $v(t) = V_0\ e^{j\omega t}$ والقيم الحقيقية للجهود والتيار هي المساقط على المحور الحقيقي لهذه الأشعة. كافة الأشعة تدور بسرعة زاوية تساوي $\omega = 6.28 \times 10^3$ rad/sec وبعكس عقارب الساعة والزوايا بين هذه الأشعة تمثل إزاحات الصفحة بين الجهود في الدارة.

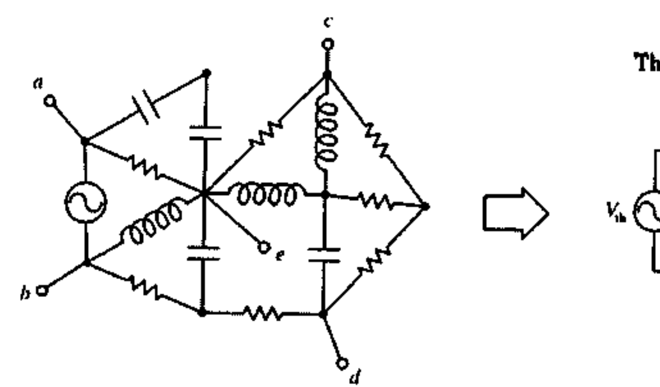


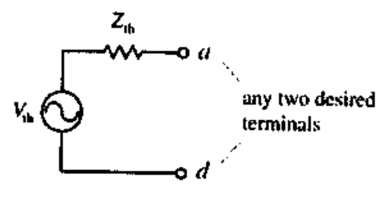
الشكل 48.2

25.2 نظرية ثيفينين في الدارة المتناوبة

يمكن تعديل نظرية ثيفينين لتصبح ممكنة الاستخدام في دارات التيار المتناوب الخطيّة وتنص نظرية ثيفينين في الدارات المتناوبة الخطية على ما يلي:

يمكن الاستعاضة عن أية دارة خطية مكونة من مقاومات، ومكثفات وملفات بمصدر جهد جيبي على التسلسل مع ممانعة مكافئة وحيدة، فمثلاً إذا أردت إيجاد الجهد بين نقطتين في دارة خطيّة مكونة من ممانعات عقدية وفيها مصدر جهد جيبي أو أردت إيجاد التيار في فرع، فإن خطوات إيجاد الجهد أو التيار تتلخص في فصل العنصر المطلوب معرفة التيار المار فيه من الدارة، إيجاد (V_{th})، قصر منبع الجهد وإيجاد (Z_{th}) وبعد ذلك وصل العنصر المطلوب إيجاد تياره مع مكافئ ثيفينين وتطبيق قانون أوم على الدارة الناتجة لحساب التيار وكذلك لحساب الجهد على طرفي العنصر. يبيِّن الشكل (49.2) مكافئ ثيفينين لدارة مكونة من ممانعات عقدية ويطبق عليها جهد جيبي. الممانعات العقدية هي ملفات ومكثفات وطبعاً يوجد بالإضافة إليها مقاومات.



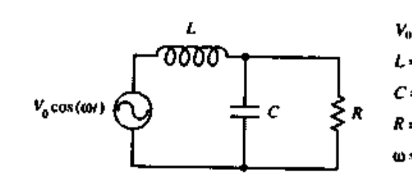


الشكل 49.2

مثال:

يُطلب إيجاد التيار الذي يمر في المقاومة المبينة في دارة الشكل (50.2) باستخدام نظرية ثيفينين.

الحل:



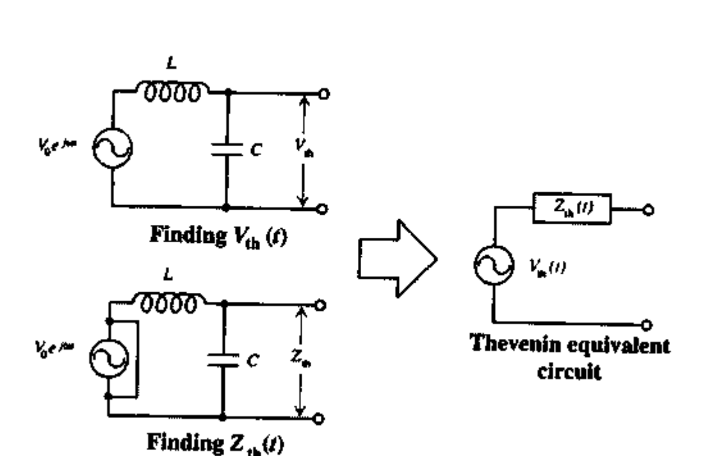
لإيجاد مكافئ ثيفينين للدارة نقوم بفصل المقاومة R من الدارة ونوجد V_{th} ومن الشكل نلاحظ أن:

$$v_{th}(t) = \frac{Z_C}{Z_C + Z_L} . V_0 e^{j\omega t}$$

Z_C: ممانعة المكثف

Z_L: ممانعة الملف

$$v_{th}(t) = \frac{\frac{1}{j\omega c}}{\frac{1}{j\omega c} + j\omega L} V_0 e^{j\omega t} = \left(\frac{1}{1-\omega^2 LC}\right) V_0 e^{j\omega t}$$



الشكل 50.2

ومن المعطيات لدينا:

$V_0 = 10$ V; $L = 200$ mH; $C = 20$ nF; $R = 3300\ \Omega$; $\omega = 1 \times 10^4$

إذن:

$\omega^2 LC = (10^4)(0.200)(2 \times 10^{-8}) = 0.400 \Rightarrow$

$V_{th}(t) = (16.67)\ e^{j\omega t}$

لإيجاد Z_{eq} نقصر منبع الجهد الموجود في الدارة فنلاحظ أن:

$$Z_{eq} = \frac{Z_C \times Z_L}{Z_C + Z_L} = \frac{(1/j\omega c)(j\omega L)}{\frac{1}{j\omega c} + j\omega L}$$

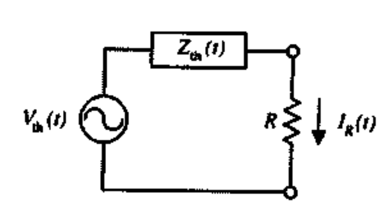
$$= \frac{j\omega L}{1-\omega^2 LC} = \frac{j(10^4)(0.200)}{1-0.4} = j(3333)\Omega$$

نعيد وصل المقاومة R مع مكافئ ثيفينين ومن أجل إيجاد التيار نوجد الممانعة الكلية للحلقة:

$$Z = R + Z_{th} = 3300 + j3333 = 4690e^{j(45.3)}$$

$$I_R = \frac{V_{th}}{Z} = \frac{16.67\,e^{j\omega t}}{4690\,e^{j(45.3)}} = (3.55mA)(e^{j(\omega t-45.3)}) \Rightarrow$$

$$I_R = (3.55mA)\,Cos(\omega t - 45.3^\circ)$$



تابع الشكل 50.2

26.2 الاستطاعة في دارات التيار المتناوب

قد تتساءل عن كيفية حساب القيمة الوسطى للاستطاعة المصروفة في دارة خطيّة يُطبق عليها جهد جيبي خلال دور واحد. ربما تفكر بأن الجواب سيكون استخدام العلاقة:

$$P_{av} = I_{rms}^2 . R$$

وتستبدل R بـ Z (الممانعة المكافئة للدارة، وتفكيرك هذا قد يكون تبريره هو أنك استخدمت هذا القانون لأنك في دارات التيار المتناوب قد استخدمت كافة النظريات والقوانين الصالحة لدارات التيار المستمر مع استبدال المقاومة المكافئة بالممانعة المكافئة والتيار المستمر بالقيمة المنتجة للتيار المتناوب، فما المانع من تطبيق هذا الاستبدال هنا في حساب الاستطاعة؟ وفي الواقع فإن هذا الاستبدال لا يصح هنا من أجل حساب الاستطاعة وذلك لأن المقاومات الموجودة في دارة تحوي أيضاً ملفات ومكثفات هي الوحيدة التي تبدد الطاقة أي تستهلك الطاقة أو الاستطاعة، أما المكثفات والملفات فإنها تخزن الطاقة ولذلك من الضروري معرفة القسم الحقيقي من الاستطاعة العقدية Complex power ومعرفة القسم الردي من الاستطاعة (reactive). والطريقة البسيطة في إيجاد الاستطاعة المتوسطة الحقيقية هي استخدام العلاقة التالية:

$$P_{av} = R_e\,(V\,I^*) = |V.I^*|\,Cos\phi$$

حيث $(V\,I^*)$ هي الاستطاعة العقدية Complex Power و V و I هي القيم المنتجة. يسمى $Cos\phi$ باسم عامل الاستطاعة Power factor وهو عبارة عن نسبة القسم الحقيقي من ممانعة الدارة إلى طويلة الممانعة الكلية للدارة وهو يعبر عن تجيب الزاوية بين الجهد المطبق على الممانعة الكلية للدارة والتيار الذي يمر فيها.

$$Cos\phi = \frac{R_e\,Z}{|Z|} = \frac{R_e\,Z}{\sqrt{(R_e\,Z)^2 + (I_m\,Z)^2}}$$

$R_e\,Z$: القسم الحقيقي من الممانعة الكلية للدارة، وإذا تم التعبير عن الممانعة بالشكل العقدي المألوف $Z = a + jb$ فإن $R_e\,Z = a$ و $I_m\,Z = b$. في الدارات الردية الصرفة (أي التي لا تحوي مقاومات يكون عامل الاستطاعة مساوياً صفر، أما في الدارات الأومية الصرفة فإن عامل الاستطاعة يساوي الواحد، لأن فرق الصفحة بين الجهد والتيار يساوي الصفر. في الدارات العملية التي تحوي عناصر ردية تساهم هذه العناصر في استهلاك جزء من التيار المفيد اللازم لتغذية الحمل، ولموازنة هذا التأثير فإن المكثفات غالباً ما تضاف إلى الدارة للحد من هذا الأثر الردي ولتحرير التيار المفيد اللازم لتغذية الحمل الأومي.

27.2 الديسيبل

تحتاج في الإلكترونيات كثيراً لإجراء مقارنات بين مطالات نسبية واستطاعات نسبية لإشارتين. مثلاً إذا كان لديك مضخم جهد خرجه يساوي (10) عشر أضعاف جهد الدخل ($V_{out}/V_{in} = 10$)، أي أن الخرج أكبر من الدخل بعشر مرات ونسبة التكبير هذه تسمى ربح المضخم (amplifier gain)، أما إذا كانت لديك دارة خرجها أصغر من دخلها، فإن هذه الدارة تسمى دارة تخميد وتسمى نسبة الخرج إلى الدخل باسم التخميد (attenuation).

إن استخدام النسب للمقارنة بين الإشارات شائع الاستخدام ولا يقتصر استخدامه على مجال الإلكترونيات. ولكن هناك حالات يكون فيها المجال بين نسب مطالات الإشارات أو استطاعات الإشارات كبيراً جداً كقدرة أذن الإنسان مثلاً على تمييز مستويات مختلفة من شدة الصوت والتي تمتد من (10^{-12}) إلى (1) واحد W/m^2 أي أن نسب الشدات سوف تغطي المجال من (10^{-12}) إلى (1) وهذا المجال الكبير يمكن أن يسبب لك إشكالات إذا أردت أن ترسم مخططاً وخاصة عندما تركز على بعض النقاط في بداية ونهاية المجال. لتجنب هذه المشكلة يمكن استخدام المقياس اللوغارتمي ولهذا يُستخدم الديسيبل (decibel) والذي يُرمز له بـــ (dB). وبالتعريف تعطى نسبة مطالي إشارتين (A_1) و(A_2) مقدرة بالديسيبل وفق العلاقة التالية:

$$dB = 20Log_{10}\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$$

فمثلاً إذا كان

$$\frac{A_2}{A_1} = 2 \Rightarrow 20Log_{10}\left(\frac{A_2}{A_1}\right) = 20Log_{10}(2) = 6dB$$

وبشكل عام إذا كانت (X) هي نسبة $\frac{A_2}{A_1}$ فإنه عند التعبير عن (X) بالديسيبل تكتب X [dB] وفيما يلي بعض الأمثلة

$$X = \frac{A_2}{A_1} = 100 \Rightarrow X[dB] = 20Log_{10}(100) = 40dB$$

$$X = \frac{A_2}{A_1} = 1000 \Rightarrow X[dB] = 20Log_{10}(1000) = 60dB$$

$$X = \frac{A_2}{A_1} = 10^6 \Rightarrow X[dB] = 20Log_{10}(10^6) = 120dB$$

أما إذا كانت النسبة أقل من الواحد فإن الناتج مقدراً بالديسيبل سيكون سالباً وفيما يلي بعض الأمثلة

$$X = \frac{A_2}{A_1} = 0.5 \Rightarrow X[dB] = 20Log_{10}(0.5) = -6dB$$

$$X = \frac{A_2}{A_1} = 0.001 \Rightarrow X[dB] = 20Log_{10}(0.001) = -60dB$$

$$X = \frac{A_2}{A_1} = 10^{-6} \Rightarrow X[dB] = 20Log_{10}(10^{-6}) = -120dB$$

أما عند التعبير عن نسب الاستطاعة بالديسيبل فإننا نستخدم العلاقة التالية

$$G = \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow G[dB] = 10Log_{10}\frac{P_2}{P_1}$$

وفي هذه العلاقة تعبر P_2 وP_1 عن استطاعات إشارات، ويمكن أن تكون P_2 استطاعة خرج مضخم وP_1 استطاعة دخله والنسبة (P_2/P_1) هي ربح الاستطاعة (Power gain). إذا كان للإشارات التي تقارن نسب مطالاتها ونسب استطاعاتها نفس الشكل فإن علاقة نسبة الاستطاعات بالديسيبل تعطي نفس نتيجة نسبة المطالات لأن الاستطاعة تتعلق بمربع المطال أو P يتناسب مع (A^2) و$Log_{10}(A^2) = 2\ Log_{10}(A)$ ومن هنا يمكن إيجاد العلاقة بين معادلات الاستطاعة ومعادلات المطال (معادلات نسب الاستطاعة ونسب المطالات).

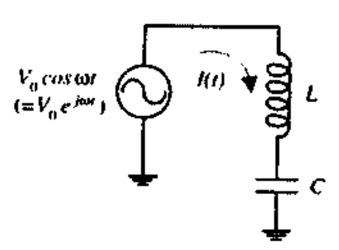
هناك حالات يُستخدم فيها الديسيبل للتعبير عن قيمة مطلقة لمطال إشارة أو استطاعتها وفي هذه الحالة يُعرَّف مستوى معياري للمطال أو الاستطاعة، فمثلاً للتعبير عن مطال إشارة جهدية منسوباً إلى مستوى جهد مرجعي (1) فولت يتم وضع مستوى مطال الإشارة مقدراً بالديسيبل ويكتب الحرف (V) في نهاية رمز الديسيبل أي dBV وفي المعادلات السابقة يمكن أن يكون $A_1 = 1\ V$ وA_2 هو المطال المراد تقديره بالديسيبل. وهناك واحدة أخرى شائعة الاستخدام وهي dBm وتستخدم لتعريف جهود منسوبة إلى جهد مرجعي يوافق استطاعة 1 mW مقدمة إلى حمل. تستخدم الـ dB وSPL في مجال الصوتيات للتعبير عن ضغط إشارة بدلالة الضغط المرجعي 20 µPa.

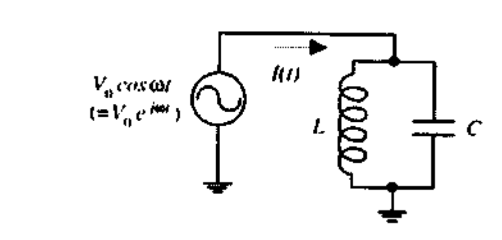
28.2 الطنين في دارات LC

تحدث في دارة LC ظاهرة مثيرة عند تطبيق جهد جيبي على الدارة له تردد خاص يسمى تردد الطنين، فمثلاً إذا طبق على الدارة المبينة في الشكل 2-51 اليساري جهد جيبي له تردد $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ فإن الممانعة الفعالة للدارة تنتهي إلى الصفر ويكون التيار الذي يمر عبر الدارة أعظميّاً، أما عند تطبيق جهد جيبي له $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ على دارة طنين تفرعية فإن الممانعة المكافئة للدارة عند هذا التردد تكون أعظميّة ويكون التيار المار في الدارة أصغرياً ويُعطى تردد الطنين f_0 بالمعادلة:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}; \omega = 2\pi f$$







الشكل 2-51

ولمعرفة آلية عمل دارة الطنين نوجد الممانعة المكافئة لدارة الطنين التسلسلية

$$Z_{eq} = Z_L + Z_C = j\omega L + \frac{1}{j\omega c} = j\left(\omega L - \frac{1}{\omega c}\right)$$

وتصبح هذه الممانعة مساوية صفر عندما يكون

$$\omega L - \frac{1}{\omega c} = 0 \Rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega c} \Rightarrow \omega^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

يُرمَز لـ (ω) التي تجعل ($Z_{eq} = 0$) بالرمز ω_0، إذن

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

وعند (ω_0) يكون التيار $i(t)$ مساوياً (∞) لأن

$$i(t) = \frac{v(t)}{Z_{eq}} = (V_0\, e^{j\omega t} / 0) = \infty$$

في الحالة العملية لا يصل التيار إلى اللانهاية وذلك بسبب المقاومة الأومية لأسلاك الدارة وكذلك بسبب محدودية تيار المصدر. إذا كنت لا تحب المعادلات تذكر أنه في حالة الطنين يكون الجهد على الملف مساوياً الجهد على المكثف ومعاكساً له بالصفحة وهذا يعني أن الجهد الفعال على مجموع العنصرين يساوي الصفر وبالتالي فإن الممانعة المكافئة للعنصرين تساوي الصفر. لدارسة الظاهرة في دارة الطنين التفرعية نوجد الممانعة المكافئة.

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega c}}$$

$$= j\omega c + \frac{1}{j\omega L} = j\left(\omega c - \frac{1}{\omega L}\right)$$

ويمكن أيضاً كتابة معادلة Z_{eq} كما يلي:

$$Z_{eq} = j\frac{1}{\left(\frac{1}{\omega L} - \omega c\right)};$$

وعندما تكون

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow Z_{eq} \to \infty \Rightarrow$$

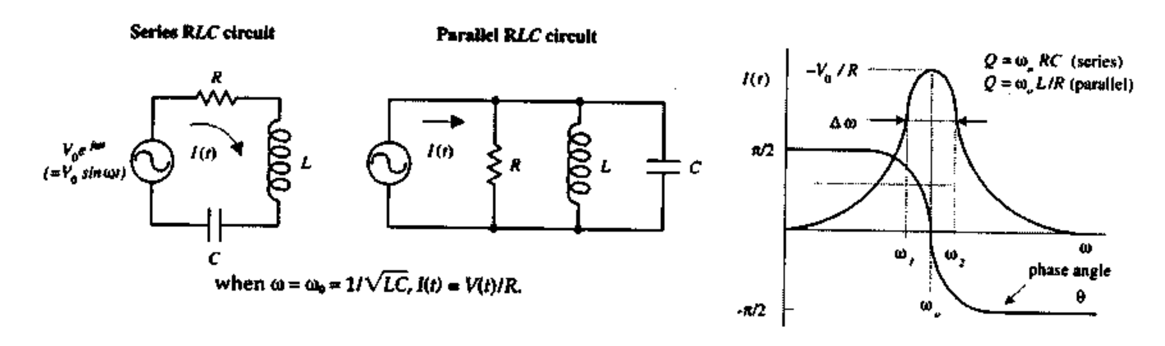
$$i(t) = \frac{V_0\, e^{j\omega t}}{Z_{eq}} = \frac{V_0\, e^{j\omega t}}{\infty} = 0$$

إذاً عند تردد الطنين تكون ممانعة الملف مساويةً ممانعة المكثف وبذلك يمر تيار في الملف مساوٍ بالقيمة لتيار المكثف ويعاكسه بالصفحة، وهذا يعني أنه في لحظة ما يمر تيار باتجاه الأعلى عبر الملف وتيار باتجاه الأسفل عبر المكثف. تيار الملف يمر باتجاه الطرف العلوي للمكثف، أما تيارُ المكثف فيمر باتجاه الطرف السفلي للملف، وفي لحظة أخرى تنعكس اتجاهات هذه التيارات ويعمل الملف (L) والمكثف (C) كزوج مهتز يمرر نفس المقدار من الطاقة باتجاه الأمام ثم الخلف ويتحدد مقدار الطاقة بقيم L وC.

يسمى التيار الداخلي الذي يمر عبر (L) و(C) باسم التيار الدوار (Circulating Current). الآن عندما يحدث تبادل القدرة بين الملف والمكثف ويمر التيار الدوار فإن المنبع الخارجي لا يقدم تياراً إلى الدارة، وذلك لأن مصدر الجهد الخارجي لا يحس بأي فرق في الجهد بين طرفي الدارة، ولو أن تياراً من المنبع الخارجي مر عبر الدارة فإن أحد العناصر (L) أو (C) يجب أن يمرر تياراً أكبر من تيار العنصر الآخر، ولكن هذا لا يحدث عند الطنين لأن تيارات (L) و(C) تكون متساوية بالقيمة ومتعاكسة بالاتجاه.

29.2 الطنين في دارات RLC

إن ظاهرة الطنين تظهر أيضاً في دارات RLC عند $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$، ولكن هنا وبسبب وجود مقاومة أومية إضافية في الدارة فإن الممانعة المكافئة لدارة الطنين التسلسلية لن تكون مساوية الصفر عند (ω_0) وكذلك لن تكون الممانعة المكافئة لدارة الطنين التفرعية مساوية (∞) عند تردد الطنين. في دارة RLC التسلسليَّة المعطاة في الشكل (52.2) عندما يصبح تردد جهد الدخل مساوياً تردد الطنين فإن L مع C يصبحان كدارة مقصورة، ولكن وبسبب وجود مقاومة فإن التيار الذي سيمر في الدارة لن يكون لا نهائياً، بل سيكون مساوياً $v(t)/R$ حسب قانون أوم، أما في دارة الطنين التفرعية فإن الممانعة المكافئة لكلٍ من (L) و(C) عند تردد الطنين ستكون (∞)، ولكن بسبب المقاومة (R) الموصولة على التوازي مع (L) ومع C فإن الممانعة المكافئة الكلية للدارة ستكون مساوية R ويمر تيار قدره ($v(t)/R$) عبر المقاومة.



الشكل 52.2

في الشكل (52.2) تُعطى أيضاً علاقة طويلة وصفحة التيار في دارة الطنين كتابع للتردد. وفي الدارتين عندما تنخفض قيمة R فإن أعظم قيمة للتيار تزداد وينخفض عرض الحزمة، ويُعرَّف عرض الحزمة في دارة الطنين بأنه المجال الترددي المحصور بين ترددي نصف الاستطاعة half power frequencies ω_1 وω_2. ونصف الاستطاعة تعني $\frac{1}{2}P_{max}$ التي تبددها المقاومة وبالنسبة للجهد فإن نقاط نصف الاستطاعة توافق ترددات ينخفض فيها الجهد بمقدار $(1/\sqrt{2})$ من قيمة العظمى عند (ω_0)، وكذلك الأمر بالنسبة للتيار فإذا كان (I_0) هو التيار الأعظمي في الدارة عند تردد الطنين (f_0) وكان (f_L) هو التردد المنخفض لحزمة التمرير وf_H هو التردد العلوي (الحد العلوي) لحزمة التمرير فإن قيمة التيار عند (f_L) وعند (f_H) ستكون $(I_0/\sqrt{2})$. يُعرَّف عرض الحزمة Bandwidth من العلاقات التالية:

$$BW = \Delta\omega = (\omega_2 - \omega_1)$$

أما عامل الجودة (Q) quality factor فيستخدم لتحديد حِدة (Sharpness) قمة المنحني في الشكل (52.2) ويُعرَّف من العلاقة:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1}$$

ويُعطى عامل الجودة (Q) لدارة الطنين التسلسلية RLC بالعلاقة:

$$Q = \omega_0 L/R$$

ولدارة RLC تفرعية بالعلاقة:

$$Q = \omega_0 R C$$

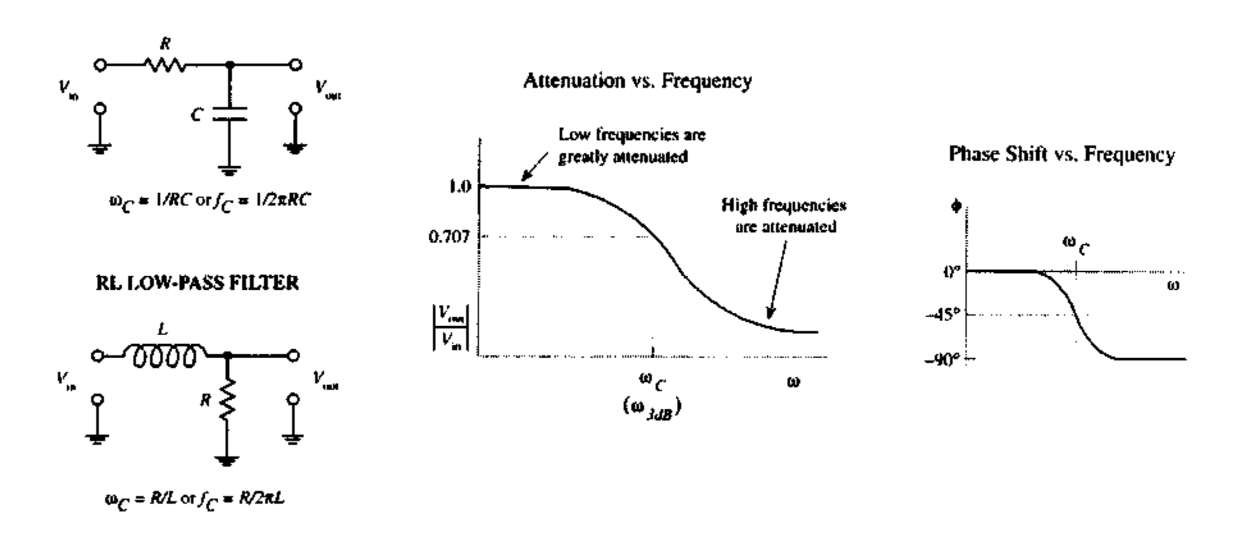
30.2 المرشحات

يمكن بوصل المكثفات والملفات والمقاومات بطرق معينة الحصول على دارات تسمح بتمرير مجال ترددي معيَّن وتمنع مجالاً آخر من المرور عبرها، وفي هذه الفقرة سوف نتعرف على الأنواع الأربعة الأساسية من المرشحات، والمرشح هو دارة تسمح بمرور مجال ترددي من دخلها إلى خرجها وتمنع أو تكبت مجالاً آخر، أما الأنواع الأربعة الأساسية للمرشحات فهي:

مرشح التمرير المنخفض	Low-pass filter
مرشح التمرير العالي	High-pass filter
مرشح تمرير الحزمة	Band-pass filter
مرشح حجز حزمة	Band-stop filter

مرشحات التمرير المنخفض

تعمل دارات RC وLR البسيطة المبينة في الشكل (53.2) كمرشحات تمرير منخفض، أي أنها تمرر الترددات المنخفضة وترفض (reject) أو تمنع مرور التيارات العالية من الدخل إلى الخرج.



الشكل 53.2

ولفهم مبدأ عمل هذين المرشحين لاحظ أن كلاً منهما هو عبارة عن مقسم جهد حساس للتردد (frequency-sensitive voltage divider) والعنصر الحساس للتردد هو العنصر الردي (reactive element)، أي المكثف (C) أو الملف (L).

في دارة مرشح RC عند تطبيق إشارة عالية التردد على الدخل، فإن ممانعة المكثف تنخفض مما يؤدي إلى مرور تيار الدخل عبر المكثف إلى الأرض وكلما زاد التردد انخفضت ممانعة المكثف أكثر ويزداد جهد الخرج انخفاضاً حتى ينتهي إلى الصفر عند الترددات العالية جداً. عند الترددات المنخفضة تكون ممانعة المكثف عالية ويمر تيار صغير جداً عبر المكثف إلى الأرض ويكون جهد الخرج تقريباً مساوياً جهد الدخل. في مرشح LR وفي مجال الترددات المنخفضة تكون ممانعة الملف منخفضة نسبياً ويمر تيار معقول عبر الملف ومقاومة الخرج R فيشكل عليها هبوط جهد هو جهد الخرج وكلما كان التردد أخفض كان جهد الخرج أقرب إلى جهد الدخل، أما إذا كان التردد عالياً فإن ممانعة الملف تزداد وينخفض التيار المار عبر الدارة وينخفض جهد الخرج وبزيادة التردد تزداد ممانعة الدارة لأن ممانعة الملف تزداد وينخفض التيار وينخفض معه جهد الخرج. يمكن التعبير رياضياً عن العلاقة بين جهد الخرج وجهد الدخل في دارة مرشح RC وفق المعادلة التالية:

$$V_{out} = \frac{V_{in} Z_C}{Z_C + R} = \frac{V_{in}(1/j\omega c)}{\frac{1}{j\omega c} + R} \Rightarrow$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1/j\omega c}{\frac{1}{j\omega c} + R} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

نحوّل المقدار $(1 + j\omega RC)$ إلى الشكل الأسي $A.e^{j\alpha}$:

$$A = \sqrt{(1)^2 + (\omega RC)^2}\ ; \alpha = \tan^{-1}(\omega RC)$$

وبناء على الشكل الأسي تكتب معادلة $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ كما يلي:

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{1}{Ae^{j\alpha}} = \left(\frac{1}{A}\right)e^{-j\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}e^{-j\tan^{-1}(\omega RC)}$$

عند دراسة المرشحات نهتم بمطال أو طويلة النسبة $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ كتابع للتردد وواضح أن طويلة النسبة $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ هي

$$\left|\frac{v_{out}}{v_{in}}\right| = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}$$

يُسمى المقدار $\left|\frac{v_{out}}{v_{in}}\right|$ طويلة عامل نقل الجهد، وهذا العامل يبيِّن مقدار نقل الجهد من دخل المرشح إلى خرجه. في مرشح RC للتمرير المنخفض عندما ينتهي (ω) إلى الصفر (ω = 0) يصبح

$$\left|\frac{v_{out}}{v_{in}}\right| = 1 \Rightarrow |v_{out}| = |v_{in}|$$

وهذا يعني أن طويلة (magnitude) جهد الخرج تساوي طويلة جهد الدخل وبالتالي فالترددات المنخفضة تمر بسهولة من الدخل إلى الخرج، أما عندما ينتهي (ω) إلى اللانهاية (ω → ∞) فإن $\frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}$ ينتهي إلى الصفر، أو

$$\omega \to \infty \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} \to 0 \Rightarrow \left|\frac{v_{out}}{v_{in}}\right| \to 0$$

$$|v_{out}| \cong 0$$

أي جهد الخرج يساوي الصفر وهذا يعني أن الترددات العالية تمنع من المرور إلى الخرج. عندما يكون تردد إشارة الدخل مساوياً لتردد القطع (cutoff frequency) والمعطى بالعلاقات التالية:

(الصيغة الزاويّة لتردد القطع): $\omega_C = \frac{1}{RC}$

(الصيغة التقليديّة) $f_C = \frac{1}{2\pi RC}$

عند (ωc) ينخفض جهد الخرج بمقدار $\frac{1}{\sqrt{2}}$ من جهد الدخل وهذا يكافئ انخفاض استطاعة الخرج إلى نصف استطاعة الدخل. يبقى هناك شيء واحد يجب الانتباه إليه عند توصيف إشارة خرج مرشح التمرير المنخفض وهو مقدار الإزاحة الصفحية لإشارة الخرج مقارنة مع إشارة الدخل.

علاقة الإزاحة الصفحية لإشارة الخرج في مرشح تمرير منخفض RC هي:

$$\phi = -\tan^{-1}(\omega RC)$$

$$\omega \to 0 \Rightarrow \phi = 0$$

$$\omega \to \infty \Rightarrow \phi \to -90°$$

وبما أن $\omega_C = \frac{1}{RC}$ فإن علاقة الإزاحة الصفحية تكتب أيضاً بدلالة (ωc) كما يلي:

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)$$

$$\omega = \omega_C \Rightarrow \phi = -\tan^{-1}(1) \Rightarrow \phi = -45°$$

أي أن فرق الصفحة بين الخرج والدخل عند (ω = ωc) يساوي (45°-).

يمكن استخدام نفس الطريقة المشروحة أعلاه لتحديد طويلة النسبة $\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)$ في مرشح LR وكذلك الإزاحة الصفحية حيث نجد أن:

$$\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right| = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega L/R)^2}}$$

وتردد قطع مرشح LR هو:

$$\omega_C = \frac{R}{L} \Rightarrow f_C = \frac{R}{2\pi L}$$

وفرق الصفحة بين الخرج والدخل:

$$\phi = -\tan^{-1}(\omega L/R) = -\tan^{-1}(\omega/\omega c)$$

طويلة عامل نقل الجهد مقدرة بالديسيبل

إذا رمزنا لطويلة $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ بالرمز A فإن A مقدراً بالديسيبل يُحسب من العلاقة التالية:

$$A = [dB] = 20Log\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$$

ويبيّن الجدول المعطى في الشكل (54.2) مقارنة بين القيم العادية للنسبة $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ والقيم المقدرة بالديسيبل.

	$\lvert V_{out}/V_{in}\rvert$	A_{dB}
Amplified output (e.g., amplifiers)	1,000,000	120 dB
	100	40 dB
	10	20 dB
	2	6 dB
	$\sqrt{2}$ (=1.414)	3 dB
Unity gain	1	0
Attenuated output (e.g., passive filters)	$1/\sqrt{2}$ (= 0.707)	-3 dB ◄ -3-dB point
	0.1	-20 dB
	1/2	-6 dB
	0.01	-40 dB
	0.000001	-120 dB

$$dB = 20\log_{10}\frac{0.707\ V}{1\ V}$$
$$dB = 20[\log_{10}(0.707) - \log_{10}(1)]$$
$$dB = 20[-0.15 - 0]$$
$$dB = -3$$

الشكل 54.2

من الجدول نلاحظ أنه عندما يكون $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$ فإن A[dB] = -3 dB وهذه النقطة تسمى نقطة الـ dB 3- وهذه النقطة هـي نفسها نقطة نصف الاستطاعة الموافقة لتردد قطع المرشح (ωc). في الجدول نلاحظ قيماً موجبة وسالبة لـ [dB] A. تسـمى النسبة $\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)$ باسم ربح المرشح وفي المرشحات السلبية (غير الفعالة) المكونة من RL أو RC أو RLC يكون الربح الأعظمـي مساوياً (1). في المضخمات (amplifiers) يكون الخرج أكبر من الدخل ولذلك تكون نسب $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ أكبر من الواحد وقيم A [dB] موجبة. أما في المرشحات فإن:

$$\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right| \le 1$$

لذلك فإن A [dB] يكون إما (0 dB) عندما $|V_{in}| = |V_{out}|$، وعندما $|V_{in}| < |V_{out}|$ فإن A [dB] يكون سالباً.

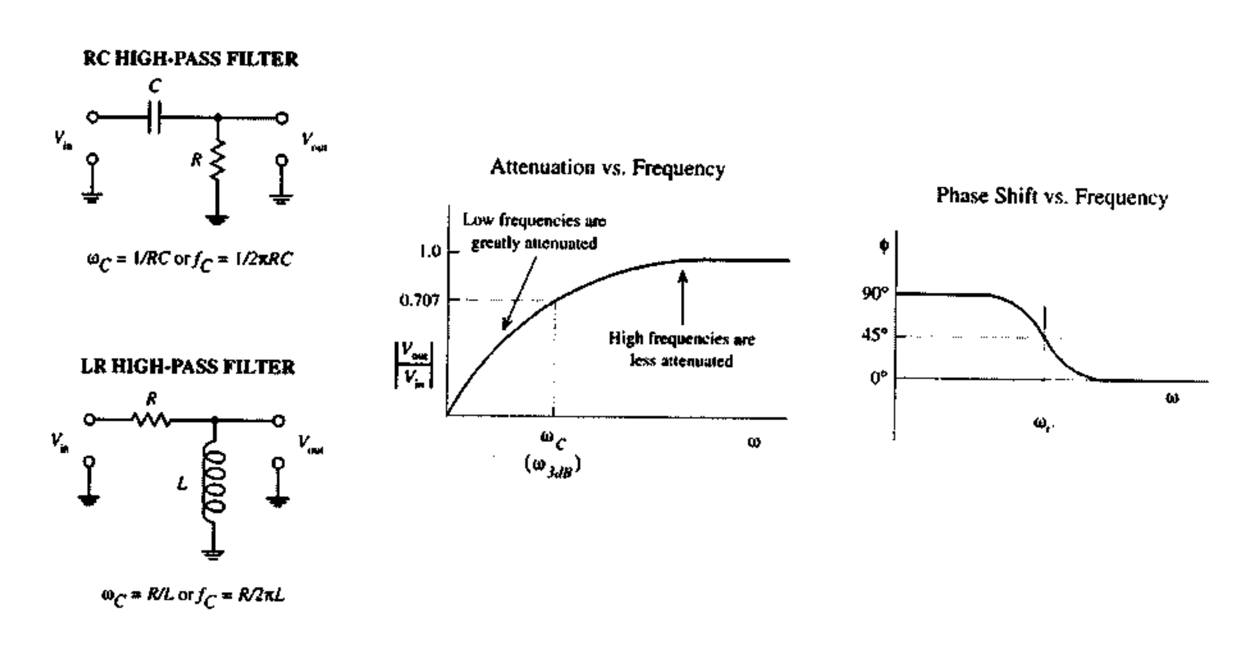
في مرشح التمرير المنخفض يكون معدّل انخفاض $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ مقدراً بالديسيبل، أي معدّل انخفاض A [dB] بعد تردد القطع مساوياً (6 dB/octave) أو (20 dB/decade) إذا كان المرشح من الدرجة الأولى (first order) كما في دارة (RC) أو (LR) السابقتين والـ (6 dB/octave) تعني ببساطة أن زيادة التردد بعامل يساوي (2)، أي تضاعف التردد يقابلها انخفاض في A [dB] قدره 6 dB أما الديكاد decade فيعني أن زيادة التردد بعامل يساوي (10) يقابلها انخفاض في قيمة A [dB] قدره 20 dB.

مرشحات التمرير العالي

يمكن تشكيل مرشح تمرير عال بواسطة مقاومة ومكثف أو بواسطة مقاومة وملف بوصل العناصر مع بعضها كما في الشكل (55.2) وهذه المرشحاتً تمرر الترددات العالية من الدخل إلى الخرج وتمنع مرور الترددات المنخفضة.

ملاحظة هامة جداً:

عندما نقول إن المرشح يمرر التردد العالية فالمقصود بذلك الترددات الأعلى من تردد القطع، أما الترددات المنخفضة التي يمنعها المرشح من المرور إلى الخرج فهي الترددات الأخفض من تردد القطع.



الشكل 55.2

هنا أيضاً يمكن فهم مبدأ عمل هذه المرشحات بمعالجتها كمقسمات جهد حساسة للتردد. في دارة مرشح التمرير العالي CR، عندما يكون تردد الدخل عالياً، تكون ممانعة المكثفة منخفضة ويمر تيار الدخل إلى المقاومة (R) ويكون جهد الخرج تقريباً مساوياً لجهد الدخل، أما عندما يكون التردد منخفضاً فإن ممانعة المكثف تكون عالية ويمر تيار صغير جداً من الدخل إلى الخرج وبالتالي فإن جهد الخرج يكون صغيراً، وعندما ينتهي (ω) إلى الصفر ينتهي جهد الخرج إلى الصفر.

في مرشح RL يشكل الملف ممانعة منخفضة بالنسبة للترددات المنخفضة ولذلك يكون جهد الخرج منخفضاً، أما بالنسبة للترددات العالية فإن ممانعة الملف تكون كبيرة جداً ولا يمر في الدارة إلا تيار صغير جداً ويكون جهد الخرج تقريباً مساوياً جهد الدخل. رياضياً يمكن في دارة RL التعبير عن الجهود والتيارات كما يلي ويمكن من هذه المعادلات أيضاً فهم مبدأ العمل. إذا رمزنا للتيار في الدارة بالرمز i (ωt)، فإن التيار يُعطى بالعلاقة التالية:

$$i(\omega t) = \frac{V_0}{\sqrt{(R)^2 + (\omega L)^2}} e^{j\left(\omega t - \tan^{-1}\frac{\omega L}{R}\right)}$$

المقدار $\frac{V_0}{\sqrt{(R)^2 + (\omega L)^2}}$ هو طويلة التيار:

$$\omega \to \infty \Rightarrow |i(\omega t)| \to 0 \Rightarrow$$

والمرشح يمرر الترددات العالية:

$$V_{out} = V_{in}$$

$$\omega \to 0 \Rightarrow |i(\omega t)| = \frac{V_0}{R} \Rightarrow$$
$$v_{in} - i(\omega t)R - v_{out} = 0 \Rightarrow$$
$$v_{out} - v_{in} - i(\omega t).R \Rightarrow$$
$$|v_{out}| = |v_{in}| - |i(\omega t)|.R \Rightarrow$$
$$|v_{out}| = V_0 - \frac{V_0}{R}R = V_0 - V_0 = 0$$

أي أن جهد الخرج يساوي الصفر والمرشح لا يمرر الترددات المنخفضة.

في مرشح التمرير العالي RC وعندما يكون تردد الدخل عالياً، تكون ممانعة المكثف منخفضة، ويمر تيار كبير عبر المكثف إلى الخرج كما ذكرنا وبالعكس إذا كان تردد الدخل منخفضاً ويمكن التعبير رياضياً عن مطال $\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)$ كما يلي:

$$\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right| = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (1/\omega_C)^2}}$$
$$\omega \to 0 \Rightarrow \frac{1}{\omega_C} \to \infty \Rightarrow \left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right| \to 0$$
$$\omega \to \infty \Rightarrow \frac{1}{\omega_C} \to 0 \Rightarrow \left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right| \to 1$$

أي عندما $(\omega \to \infty)$ فإن $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right| \cong 1$ والخرج يساوي الدخل.

ترددات القطع لمرشحات التمرير العالي معطاة بالعلاقات التالية:

$$\omega_C = 1/RC \Rightarrow f_C = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{(مرشح RC)}$$

$$\omega_C = \frac{R}{L} \Rightarrow f_C = \frac{R}{2\pi L} \quad \text{(مرشح RL)}$$

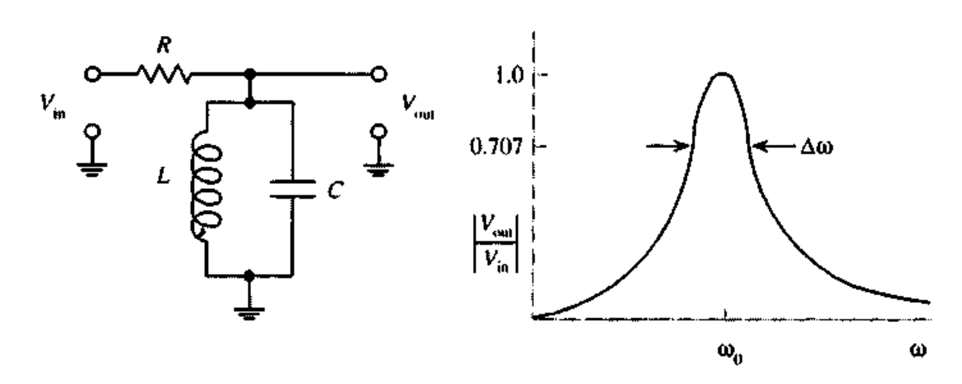
أما إزاحة الصفحة بين الخرج والدخل بدلالة (ω_C) للمرشحين فهي:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)$$
$$\omega \to 0 \Rightarrow \phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_C}{0}\right) = \tan^{-1}(\infty) = +90°$$
$$\omega \to \infty \Rightarrow \phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_C}{\infty}\right) = \tan^{-1}(0) = +0°$$
$$\omega = \omega_C \Rightarrow \phi = \tan^{-1}(1) = +45°$$

ويبيِّن الشكل (55.2) علاقة فرق الصفحة بالتردد في مرشحات التمرير العالي المدروسة هنا.

مرشح تمرير الحزمة

يمكن تشكيل مرشح تمرير حزمة باستخدام دارة طنين تفرعية كعنصر مقسِّم للجهد كما في الشكل (56.2) وبذلك تحصل على مرشح قادر على تمرير حزمة ضيقة من الترددات القريبة من تردد الطنين لدارة LC، ويسمى هذا المرشح باسم (Band-pass Filter).



الشكل 56.2

ولفهم مبدأ عمل هذا المرشح نوجد الممانعة المكافئة لدارة LC التفرعيَّة:

$$\frac{1}{Z_{LC}} = \frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega c}}$$

$$\frac{1}{Z_{LC}} = j\omega c - j\frac{1}{\omega L} = j\left(\omega c - \frac{1}{\omega L}\right) \Rightarrow$$

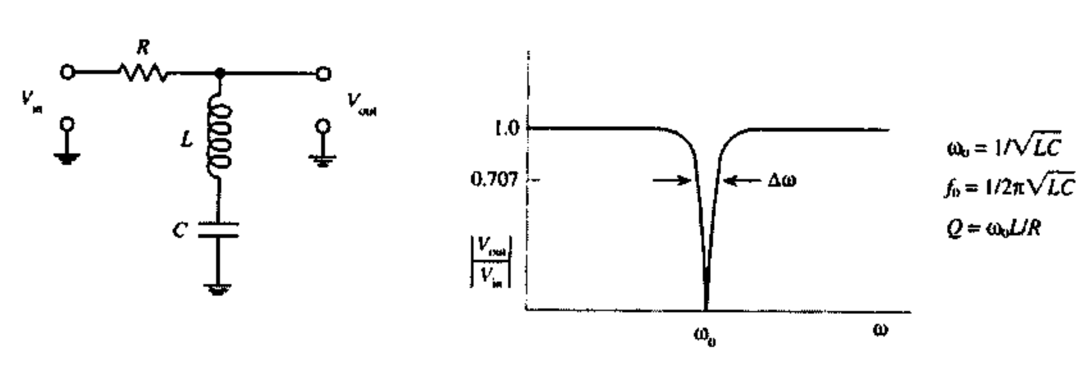
$$Z_{LC} = j\frac{1}{(1/\omega L) - \omega c}$$

عندما يصبح (ω) مساوياً $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ فإن ممانعة الدارة التفرعية تنتهي إلى اللانهاية، وإشارات الدخل التي لها ترددات قريبة من تردد الطنين تمر إلى الخرج (هذه الإشارات لا تُقصر إلى الأرض). يُعرَّف عامل الجودة لهذا المرشح بنفس طريقة تعريف عامل جودة دارة الطنين

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \omega_0 RC$$

مرشح حجز حزمة

إذا كانت حزمة الترددات المطلوب حجزها ضيقة فإن مرشح حجز الحزمة يسمى (Notch filter) أي مرشح شُقي أو ثُلمي لأن حزمة المنع تبدو مثل الشق في الاستجابة المطالية للمرشح. يتم تشكيل مرشح حجز حزمة باستخدام دارة طنين تسلسلية LC كعنصر مقسِّم للجهد، كما في الشكل (57.2) وهذا المرشح يمرر كافة الترددات ماعدا تلك القريبة من تردد الطنين لدارة LC.



الشكل 57.2

ولفهم مبدأ عمل هذا المرشح نوجد الممانعة المكافئة لدارة الطنين التسلسلية

$$Z_{LC} = Z_L + Z_C = j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

وعندما يَنتهي التردد الزاوي (ω) إلى $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$، فإن ممانعة الدارة التسلسلية تنتهي إلى الصفر ويتم قصر التيار إلى الأرض ويصبح جهد الخرج مساوياً للصفر، وهكذا يمكن فهم الشق (notch) عند التردد (ω_0) المبيَّن في الشكل 57.2.
عامل جودة المرشح هو نفس عامل جودة دارة الطنين التسلسلية

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{\omega_0 L}{R}$$

31.2 الدارات التي تطبق عليها مصادر دورية لا جيبيَّة

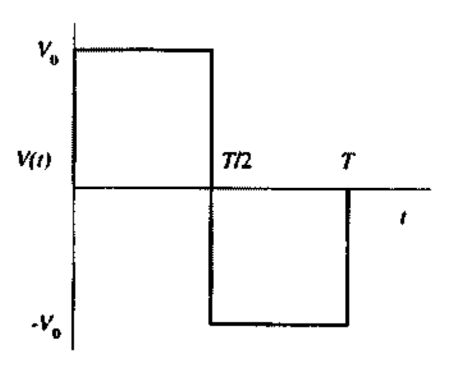
افرض أن لديك منبع جهد دوري لا جيبي (موجه مربعة مثلاً، أو مثلثية، أو سن منشارية، الخ)، وأن هذا المنبع موصول مع دارة فيها مقاومات ومكثفات وملفات، كيف ستحلل هذه الدارة؟ الدارة ليست دارة تيار مستمر (dc) ولذلك لا يمكنك استخدام نظريات تحليل الدارات المستمرة فيها، والجهد المطبق عليها ليس جيبيّاً، ولذلك لا تستطيع مباشرة الاستفادة من طريقة الممانعات العقدية في التحليل. ما الذي تفعله إذن؟

يجب أن تتذكر على الرغم من كل صعوبات التعامل مع مثل هذه الدارات أن قوانين كيرشوف قابلة للتطبيق في هذه الدارات، ولكن قبل ذلك عليك أن تفكر كيف ستعبِّر عن منبع الجهد المطبق على الدارة. كيف تعبِّر رياضياً عن منبع الجهد وبفرض أن منبع الجهد هو منبع نبضات مربعة، كيف تعبر عن الموجه المربعة رياضياً؟ في الحالة العامة هناك صعوبة في وصف تابع دوري لا جيبي بمعادلة واحدة، ولكن وبفرض أنك استطعت رياضياً التعبير عن منبع إشارة الدخل، فإنك ستواجه صعوبات في الحل لأنك وعند تطبيق قوانين كيرشوف ستحصل على معادلات تفاضلية (وطبعاً لا تستطيع استخدام الممانعات العقدية لأن إشارة الدخل ليست جيبيَّة) ولمتابعة حل الدارة عليك أن تفكر بحل أو بطريقة حل تجنبك التعامل مع المعادلات التفاضلية وتتيح لك استخدام الممانعات العقدية والطريقة الوحيدة التي تمكنك من ذلك هي التعبير عن التابع الدوري اللا جيبي كمجموع توابع جيبيّة، وقد وجد فورير Fourier أن أي تابع دوري لا جيبي هو مجموع توابع جيبيَّة، حيث برهن أن مجموعة من الموجات الجيبيّة ذات الترددات المختلفة والمطالات المختلفة يمكن أن تجمع مع بعضها وتشكل تابعاً دورياً غير جيبي، وما يهمنا نحن هو أن أي تابع دوري غير جيبي يمكن نشره (حسب فورير) بسلسلة من توابع الجيب (Sin) والـ (Cos) ذات المطالات والترددات المختلفة، وعلى سبيل المثال يمكن التعبير عن الموجة المربعة المبينة في الشكل (58.2) بالعلاقة التالية:

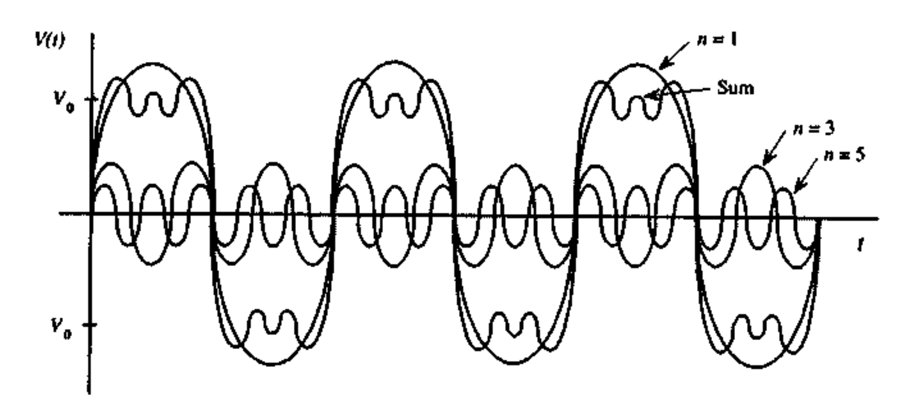
$$V(t) = \frac{4V_0}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}Sin(n\omega_0 t)$$

n = odd (فردي)

وبأخذ الحدود الثلاثة الأولى من السلسلة (n = 3) وجمعها مع بعضها تحصل على الموجة المبينة في الشكل (59.2) وطبعاً حاصل الجمع ليس موجة مربعة تماماً، ولكن عند إضافة حدود أخرى يقترب شكل المحصلة من الموجة المربعة كثيراً وبجعل (n) ينتهي إلى اللانهاية وجمع كافة الحدود تحصل فعلاً على موجة مربعة.



الشكل 58.2



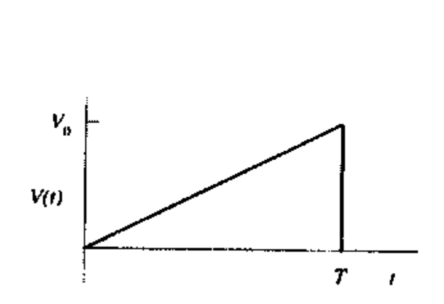
الشكل 59.2

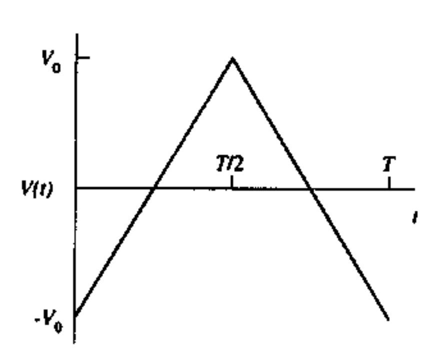
كذلك يمكن التعبير عن الموجة المثلثية المبينة في الشكل (60.2) وموجة سن المنشار المبينة في الشكل (60.2) بسلاسل فورير وفق المعادلات التالية:

$$v(t) = -\frac{8V_0}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}Cos(n\omega_0 t) \quad \text{(موجة مثلثية)}$$

n = odd (فردي)

$$v(t) = \frac{V_0}{2} - \frac{V_0}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}Sin(n\omega_0 t) \quad \text{(موجة سن المنشار)}$$





الشكل 60.2

افترض الآن أن إحدى هذه الإشارات مطبقة على دارة RLC. كي تحسب التيارات والجهود وفروقات الصفحات في الدارة، بإمكانك استبدال المنبع بسلسلة فورير لجهد المنبع، وعندها وبما أن حدود السلسلة هي توابع جيبيّة يمكنك استخدام الممانعات العقدية للملفات والمكثفات عند تحليل الدارة، ولكن الصعوبة في هذه الطريقة هي كيفية التعامل مع العدد الكبير لحدود السلسلة، فهل عليك أن تحسب التيارات والجهود مثلاً من أجل كل حد من حدود السلسلة ثم تجمع النتائج؟ بالتأكيد سيكون هذا العمل شاقاً، ولذلك يتم عادة إجراء تحليل تقريبي حيث تؤخذ عادة أول أربع حدود من السلسلة وتعالج الدارة عند كل حد من هذه الحدود ثم تجمع النتائج.

يمكنك التعرف على كيفية نشر تابع دوري لا جيبي وفق سلسلة فورير في الرياضيات، كما أن الطرق الرياضية المستخدمة لوضع وحل المعادلات التي تأخذ حدود السلسلة بالاعتبار موجودة أيضاً في مراجع الرياضيات، وهذا الموضوع خارج عن نطاق اهتمام هذا الكتاب، ولذلك لن نتعرض له هنا، وهناك عدد من الكتب والمراجع المتقدمة التي تشرح تقنيات تطبيق تحليل فورير Fourier-Analysis في تحليل الدارات التي تحوي مصادر دورية لا جيبيّة.

32.2 الدارات التي تحوي مصادر لا دورية

يمكن تمثيل التابع اللادوري كمجموع موجات جيبيّة، كما هي الحال في سلسلة فورير، ولكن حدود سلسلة فورير كانت توابع جيبيّة (Sin) أو/و (Cos) بترددات محددة من مضاعفات التردد الأساسي للإشارة الدورية.

(تتكون سلسلة فورير لتابع دوري لا جيبي عموماً من مركبة مستمرة، مركبة جيبيَّة متناوبة لها نفس تردد التابع الدوري، مجموعة مركبات دورية جيبيّة بترددات من مضاعفات التردد الأساسي)، أما هنا، أي في حالة التابع اللادوري فإن الموجات الجيبيَّة الناتجة ذات طيف ترددي مستمر (Continuous) أي غير متقطع، فالتابع اللادوري يمكن اعتباره تابعاً دورياً بدور ينتهي إلى اللانهاية. تستخدم عادة طريقتان لتحليل الموجات التي تبدأ أو تنتهي (تتوقف) بشكلٍ مفاجئ ولكنها تستمر إلى اللانهاية إما في الاتجاه الموجب أو السالب وتعتمد هذه الطرق على ما يسمى تحويل فورير (Fourier-Transform) وتحويل لابلاس Laplace-Transform، فإذا كنت مهتماً بتحليل هذه الدارات ننصحك بالعودة إلى كتب أكثر تطوراً ومتخصصة في هذا المجال.

33.2 الدارات اللاخطية وتحليل الدارات بالبديهة (الحدس)

تمت حتى الآن في هذا الفصل تغطية الطرق والتقنيات المستخدمة لتحليل الدارات التي تحوي عناصر خطية (مثل المقاومات، والملفات والمكثفات). وكلمة خطي (linear) تعني هنا عنصراً له استجابة تتناسب مع الإشارة المطبقة، فعلى سبيل المثال عند مضاعفة الجهد المطبق على مقاومة يتضاعف التيار المار فيها، وعند مضاعفة تردد الإشارة الجهدية المطبقة على مكثف يتضاعف التيار المار في المكثف، أما في الملف فإن مضاعفة تردد الجهد المطبق على الملف تؤدي إلى انخفاض التيار المار فيه إلى نصف القيمة السابقة، وكما لاحظت من خلال هذا الفصل فإن طرق وتقانات تحليل الدارات الخطية واضحة حيث توجد قوانين ونظريات تدلك على ما سيجري ويحدث في الدارة. ولكن أكثر العناصر الإلكترونية استخداماً في مجال الإلكترونيات ليست خطية كالديودات (diodes) والترانزستورات (Transistors)، والمضخمات العملياتية (operational amplifiers) والدارات المتكاملة (Integrated Circuits) وغيرها. فمثلاً العلاقة بين التيار والجهد في الديود والتي تسمى علاقة مميزة الفولت ـــ أمبير هي علاقة غير خطية وتُعطى تقريبيًّا بالمعادلة التالية:

$$I = I_0\left(e^{\frac{V}{KT}} - 1\right)$$

وإذا استخدمت هذه العلاقة في أحد تطبيقات قوانين كيرشوف فإن العلاقات الرياضية الناتجة ستكون صعبة الحل. إذن لابد من طريقة جديدة لتحليل الدارات التي تحوي عناصر غير خطيّة. ربما تفكر الآن وتقول: لا، لا أريد المزيد من الرياضيات، حسناً لا تقلق فأنت لست بحاجة لتعلم المزيد من الرياضيات، لأن ما سوف تفعله هو استخدام البديهة. قد يبدو ذلك غريباً، ولكن ومن باب الحديث العملي عن الموضوع فإن البديهة هي أفضل وسيلة لتحليل الدارات اللاخطية، (يمكن أيضاً استخدام البديهة في تحليل الدارات الخطية). تتطلب هذه الطريقة فهماً لآلية عمل وسلوك العنصر غير الخطي (أو الخطي) وذلك لتكوين فكرة عامة عن علاقات الجهد والتيار الخاصة بالعنصر وبأحماله المختلفة. بعد ذلك عليك دراسة دارات بسيطة (Simple Circuits) تحوي العنصر، ومعرفة السلوك (الأداء) العام للدارة وعلاقات الجهود والتيارات على أطراف الدخل والخرج. خلال عملية دراسة الدارات البسيطة تبدأ بالبحث عن أمور ونقاط تعمق فهمك لمبدأ عمل العنصر وكيفية استخدامه في التطبيقات، فعلى سبيل المثال سوف تجد أن مقسم الجهد المكون من مقاومتين على التسلسل يُستخدم أيضاً في دارات الترانزستورات كدارات المضخمات، وبالاختيار المناسب لقيم هذه المقاومات يتم ضبط الاستقطاب (biasing) المطلوب على مُتصل القاعدة/بوابة (base/gate) للترانزستور، وعادة توصل قاعدة الترانزستور إلى النقطة المشتركة بين المقاومتين. وبملاحظة هذه النقاط تصل إلى أفكار جديدة عن كيفية استخدام العناصر المنفردة في دارات أُخرى وحالما تتشكل لديك فكرة عن كيفية عمل عنصر ما وعن كيفية استخدامه، بإمكانك الانتقال إلى دارات أكبر وأكثر تعقيداً.

للتعامل مع دارات أكثر تعقيداً عليك أن تبحث ضمن هذه الدارات عن مجموعات من الدارات البسيطة أو عن ما يسمى بمجموعات وظيفية (functional groups) وليس عن مجموعات من العناصر المنفردة، فمثلاً لفهم مبدأ عمل مصدر تغذية يحول الجهد المتناوب (ac) إلى جهد مستمر (dc) عليك أن تقسم مصدر الجهد إلى مجموعة من الدارات وأن تفهم مبدأ عمل كل واحدة من هذه الدارات وبعد ذلك عليك أن تفهم كيف تعمل كل هذه الدارات مع بعض. فمثلاً في مصدر التغذية الذي يحول الجهد المتناوب (ac) إلى (dc) سوف تجد المكونات الوظيفية التالية:

- محول transformer ويستخدم لرفع أو خفض الجهد المتناوب.
- دارة مقوِّم جسري (bridge rectifier circuit) وتستخدم دارة المقوِّم الجسري لتحويل الجهد المتناوب إلى جهد مقوَّم وحيد الاتجاه.
- دارة مرشح (filter circuit)، موصولة إلى خرج المقوِّم الجسري من أجل التخلص من التموجات والتعرجات في جهد الخرج المستمر.

في هذا المثال تبيَّن لك بأن آلية عمل مصدر التغذية ليست مسألة معرفة كيفية عمل ديود محدّد أو مقاومة أو ترانزستور ضمن مجموعة وظيفية، ولكنها مسألة تحديد كيفية عمل كل مجموعة وظيفية وكيفية عمل المجموعات الوظيفية مع بعضها البعض. إذن أنت لست بحاجة لتحليل الدارة بكافة عناصرها للحصول على علاقة رياضية لوصف آلية عمل الدارة، لأن القيام بذلك بدون معنى. يركز الكتاب في فصوله القادمة على طريقة البديهة (intuitive approach) في فهم الدارات الإلكترونية.

وكل فصل من الفصول القادمة موضوع بطريقة وأسلوب يحقق الفائدة للمبتكر (المخترع inventor)، وهذا يعني بأن المعلومات المتوفرة في الكتاب تسمح لكل قارئ بأن يتعرف وبشكلٍ عملي على كيفية البدء ببناء دارته الخاصة. أما شكل أو صيغة كل فقرة من الفقرات القادمة في هذا الكتاب فإنها تبدأ بشرح أساسي لوظيفة عنصر محدد (أو لوظيفة دارة خاصة أو محددة) ولكيفية استخدام العنصر أو الدارة في التطبيقات، بعد ذلك يتم شرح مبدأ عمل العنصر (فيزيائياً)، وبعدها تُناقش الأنواع الحقيقية للعنصر والتي تتوفر فعلياً (العناصر التي تجدها وتشتريها إن رغبت من محلات بيع القطع الإلكترونية). كذلك سوف تجد شرحاً لمواصفات ومميزات العنصر كمعدلات الاستطاعة، الاستقطاب، الجهود، وغيرها.

وفي نهاية كل فقرة تُعطى بعض الدارات البسيطة لإكمال العملية التعليميّة.


https://maktbah.net

3

العناصر الأساسية للدارات الإلكترونية

تشكل الأسلاك (wires) والكوابل (cables) ممرات منخفضة المقاومة للتيارات الكهربائية وتصنع أغلب الأسلاك الكهربائية من النحاس أو الفضة وتعزل عادة بغلاف عازل من البلاستيك أو المطاط (rubber) أو الدهان الشفاف العازل (Lacquer). يتكون الكابل من عدد من النواقل (الأسلاك) المعزولة المجدولة مع بعض والتي تشكل خط نقل متعدد النواقل multi-conductor transmission line. الموصلات (connectors) كالمآخذ (plugs) أو القوابس والمقابس (jacks) وأدوات الوصل بين الكوابل أو الأجهزة (adapters) هي عبارة عن تجهيزات تستخدم كأدوات ربط (fasteners) لوصل الأسلاك والكوابل مع الأجهزة الكهربائية.

1.1.3 الأسلاك

يتم التعبير عن أقطار الأسلاك برقم معياري (gauge number) وفقاً لنظام متبع لأرقام أقطار الأسلاك (gauge system)، وفي هذا النظام كلما زاد قطر السلك انخفض الرقم المستخدم للدلالة على قطره (أي أن نظام الترقيم معاكس للواقع الفعلي) وبزيادة قطر السلك تنخفض مقاومة السلك، وعندما تتوقع أن تكون التيارات التي ستمر في السلك عالية يجب أن تستخدم سلكاً بقطر كبير (أي رقم السلك صغير) وذلك لأن استخدام سلك بقطر صغير يؤدي إلى ارتفاع حرارة السلك أثناء عمل الدارة وربما إلى انصهاره.

يبيّن الجدول 1.3 مجموعة مختلفة من المواصفات لأسلاك نحاسية (B & S - gauged) في درجة الحرارة 20 °C. إذا كان العازل المستخدم من المطاط يجب تخفيض التيار المسموح تمريره عبر السلك بنسبة (% 30).

الجدول 1.3 مواصفات الأسلاك النحاسية وفقاً لرقم السلك.

GAUGE	DIAMETER (IN)	ALLOWABLE CURRENT (A)	FT\LB	FT\Ω
8	0.128	50	20.01	0.628
10	0.102	30	31.82	0.999
12	0.081	25	50.59	1.588
14	0.064	20	80.44	2.525
16	0.051	10	127.9	4.016

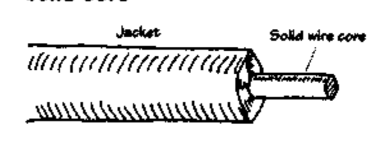
GAUGE	DIAMETER (IN)	ALLOWABLE CURRENT (A)	FT\LB	FT\Ω
18	0.040	5	203.4	6.385
20	0.032	3.2	323.4	10.15
22	0.025	2.0	514.2	16.14
24	0.020	1.25	817.7	25.67
26	0.016	0.80	1300.0	40.81
28	0.013	0.53	2067.0	64.90
30	0.010	0.31	3287.0	103.2

وتتوفر الأسلاك بأنواع مُختلفة كالأسلاك ذات اللب الصلب المستقيم، والأسلاك ذات اللب الملفوف من عدة أسلاك أو الأسلاك ذات اللب المجدول كالحصيرة، وفيما يلي نتعرف على أنواع مختلفة من الأسلاك.

أسلاك اللب (النواة) الصلب

يُستخدم هذا النوع من الأسلاك لإجراء توصيلات بين نقاط مختلفة على لوحة اختبار تجريبيّة في ورشة إلكترونية وذلك لأن الناقل المعدني للسلك يمكن إدخاله بسهولة في ثقوب اللوحة ولا ينفلت من الثقب أثناء التعامل مع لوحة الاختبار، ولكن هذه الأسلاك سريعة الكسر إذا تعرضت للانحناء والالتواء مرات عديدة أثناء الاستخدام.

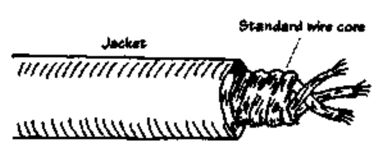
Solid Core



الأسلاك الشعرية (الخيطية)

يتكون الناقل الأساسي في هذا النوع من الأسلاك من عدد من الأسلاك الشعرية (الرفيعة أو الخيطيّة) المصنوعة من النحاس، وتعتبر هذه الأسلاك ذات ناقلية أفضل من السلك ذي اللب الصلب، لأن الأسلاك الشعرية مع بعضها تكون سطحا أكبر (مساحة سطح أكبر) وتمتاز هذه الأسلاك بمقاومة الكسر عند ثنيها.

Stranded Wire



الأسلاك المجدولة

يتكون السلك المجدول من عدد من الأسلاك الشعرية المجدولة مع بعضها البعض، وهذا النوع من الأسلاك أفضل ناقلية للتيار من الأسلاك ذات النواة الصلبة ولا تنكسر أو تتقطع عند ثنيها. تستخدم الأسلاك المجدولة كوسيلة لحجب الحقول الكهرومغناطيسية عن الناقل الداخلي للكابل كما يمكن أن تُستخدم أيضاً كناقل ضمن الكابل (كما في الكوابل المحوريّة).

ويبيِّن الشكل (1.3) أنواع الأسلاك الثلاثة المذكورة سابقاً.

Braided Wire

Jacket
Braid

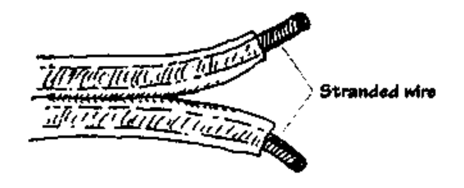
الشكل (1.3): أنواع مختلفة من الأسلاك.

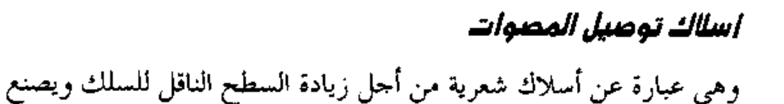
الاسلاك ذات الناقل الصلب المعالج بالقصدير

تسمى هذه الأسلاك أيضاً باسم (hookup wires) وتستخدم لوصل الدارات الكهربائية مع بعضها. يتكون ناقل السلك من خليطة من الرصاص — قصدير لتسهيل عملية اللحام وتعزل عادة بعازل من نوع بوليفينيل — كلوريد (PVC) أو البولي اثيلين أو التيفلون. تستخدم في تشكيل بطاقات الدارات المطبوعة، وفي مشاريع الهواة البسيطة وفي غيرها من التطبيقات التي تحتاج إلى أسلاك طرفية. يبيِّن الشكل (2.3) مجموعة من هذه الأسلاك مختلفة المقاطع بدءاً من المعيار الصغير (small gauge) والذي يعني قطراً كبيراً حتى المعيار الكبير (Large gauge) والذي يعني قطراً صغيراً.

Pretinned Solid Bus Wire
Large gauge
Small gauge

Speaker Wire





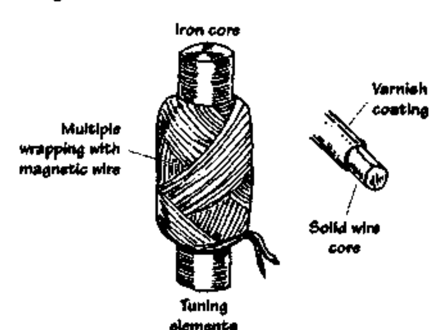
اسلاك توصيل المصوات

وهي عبارة عن أسلاك شعرية من أجل زيادة السطح الناقل للسلك ويصنع السلك من خليطة غنية بالنحاس لتحقيق ناقلية عالية.

الاسلاك المغناطيسية

تستخدم هذه الأسلاك من أجل تكوين ملفات أو أي شيء يتطلب عدداً كبيراً من اللفات، مثل عناصر التوليف في أجهزة الاستقبال (radio receivers). تتكون هذه الأسلاك من نواقل ذات نواة صلبة وتعزل بالورنيش (varnish). تقع أبعاد مقاطع هذه الأسلاك في مجال المعايير من (22) وحتى (30).





الشكل (2.3): أسلاك التوصيل المعالجة بالقصدير.

2.1.3 الكوابل

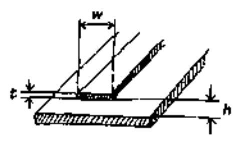
يتألف الكابل من عدد من الأسلاك ويمكن أن تكون الأسلاك ضمن الكابل من النوع الصلب أو من النوع الشعري، أو المجدول أو خليط من الأنواع ويبيِّن الشكل (3.3) الأنواع النموذجية للأسلاك ضمن الكوابل وهي:

- زوج من النواقل Twin Lead.
- خـــط نقل محوري (كبل محوري) يتكون من ناقل داخلي صلب حوله عازل والعازل محاط من الخارج بناقل مجدول من أسلاك شعرية.
- شريط ناقل (ribbon) فوق مستوى ناقل يفصل بينهما عازل.
- زوج مجدول من النواقل Twisted pair.
- سلك ناقل فوق مستوى ناقل، يفصل بينهما عازل.
- خط شريحي (شرائحي) Strip Line.

Twin Lead

Coaxial

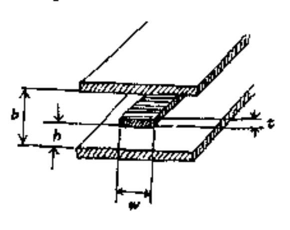
Ribbon and Plane



Twisted Pair

Wire and Plane

Strip Line



الشكل (3.3): أنواع الأسلاك ضمن الكوابل.

أنواع الكوابل

الكابل الثنائي

Paired Cable



يتكون هذا الكابل من ناقلين كل واحد منهما معزول والخطان المعزولان ملتصقان ببعض. يستخدم هذا النوع من الكوابل في نقل التيارات المستمرة وكذلك في دارات التيار المتناوب منخفضة التردد.

الازواج المجدولة

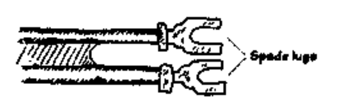
Twisted Pair



يتكون هذا الكابل من سلكين ناقلين معزولين ومجدولين مع بعضٍ وهو مشابه للكابل الثنائي ولكن السلكين مجدولين مع بعض جدلا دون أن يكون عازلاهما ملتصقين.

الكابل ذو الناقلين

Twin Lead

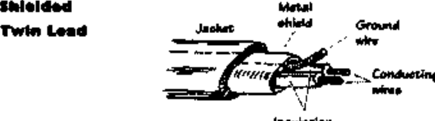


الشكل (4.3): أنواع الكوابل.

هذا الكابل عبارة عن ناقلين سلكيين مسطحين ويسمى عادة باسم كابل بممانعة Ω 300، لأن الكابل يبدي ممانعة Ω 300. يستخدم هذا النوع من الكوابل بشكلٍ أساسي كخط نقل بين الهوائي وجهاز التلفزيون وكل ناقل من الناقلين الاثنين ضمن الكابل هو عبارة عن مجموعة أسلاك شعرية من أجل تخفيضٍ ظاهرة الأثر الجلدي Skin-effect وهذه الظاهرة تسمى أيضاً ظاهرة الأثر القشري وملخصها أن التيارات عالية التردد تمر عبر قشرة الناقل (أو سطحه مبتعدة عن نواته).

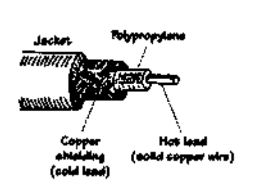
الكابل ذو الناقلين المحجوب

هذه الكوابل تشبه الكوابل الثنائية ولكن النواقل الداخلية محاطة بورق معدني (metal foil) ملفوف حولها وموصول مع خط تأريض. يُوضع الورق المعدني حول النواقل الداخلية لحمايتها من الحقول المغناطيسيّة الخارجية ومن القوى الخارجية التي يمكن أن تخلق إشارات ضجيجيّة (noisy signals) في الأسلاك الداخلية.



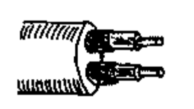
كابل محوري غير متوازن

يستخدم هذا النوع من الكوابل لنقل الإشارات عالية التردد كالإشارات الراديوية، وذلك لأن البنية الهندسية للكابل تَحُدُّ كثيراً من التأثيرات التحريضية والسعوية، كما تحد من تأثير الحقول الكهرومغناطيسية الخارجية. يتكون الناقل الداخلي من سلك نحاسي قاسٍ ويستخدم كناقل ساخن (hot lead)، تحيط بالناقل الداخلي مادة عازلة كالبولي ايتيلين وتفصل هذه المادة العازلة الناقل الداخلي عن الناقل الثاني الذي يُغلف العازل والمكون من أسلاك مجدولة على شكل حصيرة. يسمى الناقل المحيط بالعازل باسم الناقل البارد cold wire أو خط الأرضي ground lead. تعتبر الكوابل المحورية غير المتوازنة هي أكثر الكوابل وثوقية واستخداماً لنقل المعلومات. تبلغ الممانعة المميزة لهذه الكوابل حوالي (50) إلى (100) أوم.



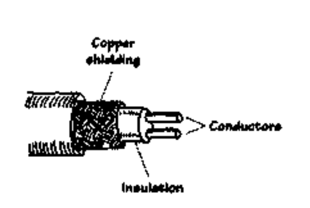
الكابل المحوري المزدوج

يتكون هذا الكابل من كابلين محوريين غير متوازنين ومحاطين بعازل خارجي واحد. يستخدم هذا النوع من الكوابل لنقل إشارتين.



الكابل المحوري المتوازن

يتكون هذا الكابل من سلكين صلبين معزولين عن بعض بواسطة عازل من البلاستيك، وبشكلٍ مشابه للكابل المحوري غير المتوازن فإن هذا الكابل مزوَّد أيضاً بحجب نحاسي (copper shielding) لمنع التقاط الضجيج ولكن وبخلاف الكابل غير المتوازن فإن الناقل الذي يستخدم للحجب والمكون من أسلاك شعرية مجدولة كحصيرة لا يُستخدم كمسار ناقل للإشارة ووظيفته هي فقط الحجب لمنع تأثير الحقول الكهرومغناطيسية الخارجية.



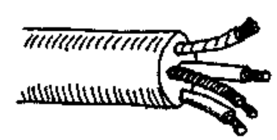
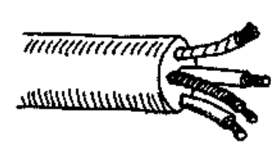
الشريط متعدد النواقل

يستخدم هذا النوع من الأشرطة عند الحاجة لعدد كبير من النواقل وتمتاز هذه الأشرطة بسهولة الانحناء دون أن تتعرض للكسر (لينة) وتصمم عادة بحيث تستخدم في التطبيقات منخفضة الجهد والتيار، وتوجد غالباً في النظم الرقمية (digital systems) كالحواسيب وذلك لنقل بتات المعلومات (information bits) على التوازي من جهاز رقمي إلى آخر.



تابع الشكل (4.3): أنواع الكوابل.

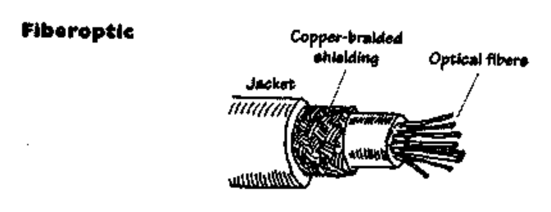
الكابل متعدد النواقل

تحوي كوابل هذا النوع على عدد من الأسلاك الملفوفة وذات الألوان المختلفة، وتستخدم لإرسال عدد كبير من الإشارات عبر كابل واحد.

كوابل الألياف الزجاجية

تستخدم كوابل الألياف الزجاجية لنقل إشارات كهرومغناطيسيَّة كالإشارات الضوئية. يُصنع وسط النواة الناقل (Conducting Core Medium) من مادة زجاجية محاطة بغلاف مصنوع أيضاً من ليف ضوئي ولكن له عامل انعكاس أعلى من عامل انعكاس النواة. تنتقل الإشارة الكهرومغناطيسية عبر الكابل عن طريق الانعكاسات الداخلية المتعددة. تستخدم كوابل الألياف الزجاجية من أجل النقل المباشر للصور (images) وللإشارات المعدّلة في نظم الاتصالات. يتكون الكابل الواحد من عدة نواقل ضوئية داخلية. يبيِّن الشكل (4.3) كافة أنواع الكوابل المذكورة.

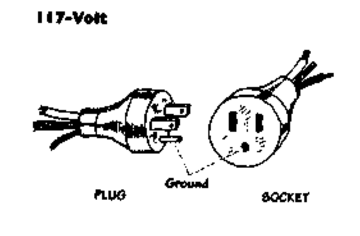


تابع الشكل (4.3): أنواع الكوابل.

3.1.3 الموصلات

نتعرف فيما يلي ومن خلال الشكل (5.3) على مجموعة من القوابس (plugs، نهاية ذكرية) والمقابس (jacks، نهاية أنثوية) والتي تستخدم لتثبيت ووصل الكوابل مع الأجهزة الكهربائية. تتكون الموصلات من قوابس ومقابس. ومن أجل وصل النهايات غير المتوافقة للمقابس والقوابس مع بعض تستخدم عادة أدوات الوصل الموافقة (adapters)، التي تؤمن التوفيق بين القابس والمقبس.

موصلات جهد شبكة المدنية 117 Volt

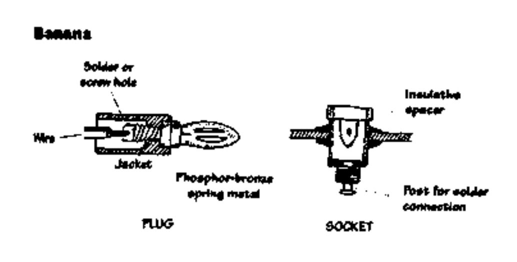


تستخدم موصلات جهد شبكة المدنية، القابس والمقبس في البيوت وتتوفر بأشكال مستقطبة وغير مستقطبة وكلا النوعين يتوفران مع أو بدون خط تأريض.

موصلات البنان Banana

تستخدم هذه الموصلات لربط (وصل) أسلاك الإشارات مع الأجهزة الكهربائية، وغالباً ما تستخدم هذه الموصلات في أجهزة الاختبار.

يتكون القابس من أربع وريقات نابضية متصلة مع بعض من الأمام ويتم عند الاستخدام إدخال هذه الوريقات في المقبس.

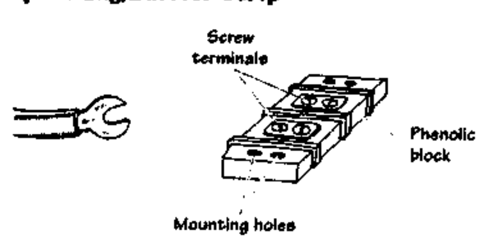


الشكل (5.3): أشكال الموصلات المختلفة.

موصلات تثبيت لأسلاك مزودة بعروة

يُستخدم في هذا النوع من الموصلات براغي لتثبيت عروة معدنية إلى طرفيه. تستخدم عادة قطعة من مادة عازلة مقسمة إلى قطاعات، يتسع كل قطاع لعروة من كل طرف وتوضع براغي التثبيت وشريحة معدنية تحت البراغي كي تلامس العروة اليمينية واليسارية لتحقيق وصل بينهما، وتسمى هذه القطعة باسم (Barrier Strip)، يمكن أن يُطلق على هذه الموصلات اسم موصلات عروة ـــ شريحة.

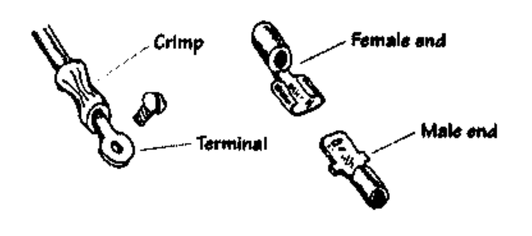
Spade Lug/Barrier Strip



الموصلات ذات الثنيه Crimp

تُرَمَّز الموصلات ذات الثنيه لونياً (color-coded) وفقاً لأبعاد الأسلاك التي تتلاءم معها، ويمكن أن تستخدم هذه الموصلات كموصلات احتكاكية سريعة الاستخدام في تطبيقات التيارات والجهود المستمرة حيث تُفصل التوصيلات بشكلٍ متكرر. تستخدم أداة ثني من أجل تثبيت الأسلاك في الموصل.

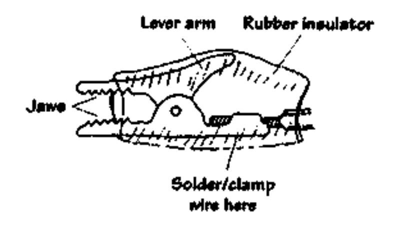
Crimp



موصل راس التمساح Alligator

تستخدم موصلات رأس التمساح بشكلٍ أساسي مع أسلاك ومجسات الاختبار.

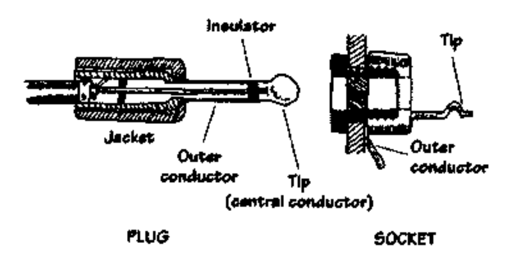
Alligator



الموصل الصوتي Phone

تتوفر هذه الموصلات بأنواع إما ذات عنصرين أو ثلاثة عناصر وتتكون من ماسورة طولها (1.25) إنش أو (31.8 mm)، وتستخدم في كوابل الميكروفونات (microphone cables) وفي تطبيقات أخرى منخفضة الجهد والتيار. يُدخل السلك الناقل للإشارة في طرف القابس الخلفي ويوصل الناقل الداخلي لكابل الإشارة عبر قطعة ناقلة ضمن القابس إلى طرف كروي يظهر كرأس للقابس أما الناقل الخارجي فيوصل مع ناقل آخر في القابس.

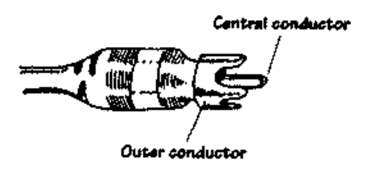
Phone



موصلات Phono (صوتية)

تسمى موصلات الـــ phono باسم قوابس RCA وتستخدم عادة في التوصيلات الصوتية، وتسمى أيضا باسم (pin plugs) أو القوابس الإبرية (الخابورية).

Phono



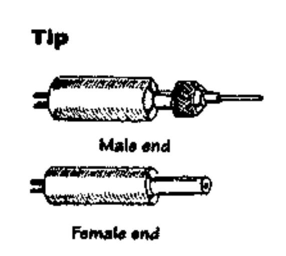
تابع الشكل (5.3): أشكال الموصلات المختلفة.

F-Type
Internally threaded connecting shell
Male end
Female end

موصلات نوع F-

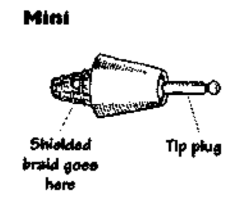
تستخدم الموصلات من النوع F مع أنواع مختلفة من الكوابل المحوريّة غير المتوازنة، وهي شائعة الاستخدام في التوصيلات البينية لمكونات أجهزة الفيديو وهي إما محلزنة أو تتماسك مع بعضها بمجرد إدخال القابس في المقبس.

الموصلات التي لها راس على شكل قلم



يتكون القابس من رأس معدني يتم زلقه أثناء الوصل ضمن المقبس ويتماسك القابس والمقبس بالاحتكاك فقط. تلحم الأسلاك مع القابس أو المقبس أو تثبت ببراغي.

موصلات Mini



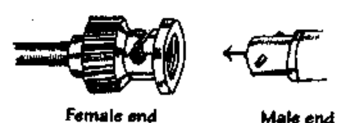
تستخدم هذه الموصلات لوصل الأسلاك مع الكوابل المحجوبة بحصيرة من الأسلاك المجدولة. يتم وصل رأس القابس مع الناقل الداخلي للقابس أما الامتداد المعدني الاسطواني أو الماسورة فيوصل مع الحصيرة المجدولة. تُعرَّف أو تميَّز هذه الموصلات بقطرها (diameter).

الموصل PL-259



تسمى هذه الموصلات باسم مقابس UHF وتستخدم مع الكوابل المحورية نوع RG-59/U. يتحقق التماسك بين القابس والمقبس إما بمجرد الاحتكاك أو يمكن أن تكون الطرفيات محلزنة.

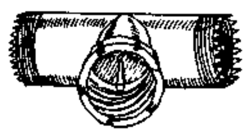
موصلات BNC



تستخدم موصلات الـــ BNC مع الكوابل المحورية وبعكس قوابس النوع F فإن موصلات الـــ BNC تستخدم طريقة لتحقيق التماسك بين القابس والمقبس حيث يكون القابس مزوداً بنتوءين متقابلين ويُدخل القابس في المقبس ويتم تدويره قليلاً فتستقر النتوءات في أماكن مخصصة لها في المقبس، وبذلك يتحقق الوصل والتماسك المطلوب.

موصلات T



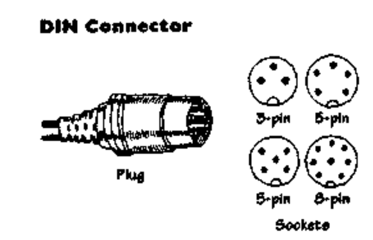


تتكون موصلات الشكل (T) من نهايتين كل نهاية منهما عبارة عن قابس أما في الوسط فيوجد مقبس، وتستخدم لإجراء توصيل لكابل مع كابلين في مكانٍ ما.

تابع الشكل (5.3): أشكال الموصلات المختلفة.

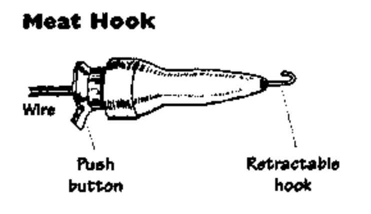
موصلات DIN

تحوي هذه الموصلات على نواقل متعددة وتستخدم لإجراء توصيلات مع أجهزة الحواسيب أو مع الأجهزة الصوتية.



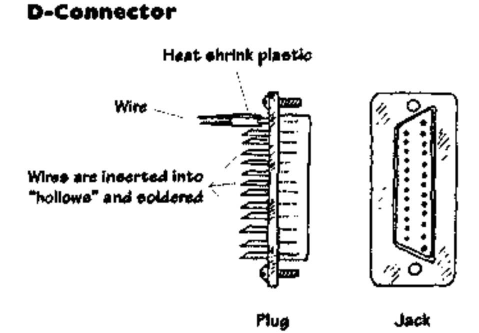
موصل ذو خطاف

تستخدم هذه الموصلات في مجسات الاختبار حيث يتم الضغط إلى الخلف على الجسم الذي يخرج منه الخطاف فيفتح الخطاف ويعود إلى حالة قفل بتأثير نابض بعد وضعه على التماس الذي يتم إجراء اختبار عليه. يمكن بواسطة هذا الموصل التقاط طرف عنصر إلكتروني أو أطراف مجموعة أسلاك.



الموصلات D

تستخدم هذه الموصلات مع كابل شريطي (Ribbon Cable) ويمكن أن يحوي الموصل الواحد على (50) تماساً، ويتم توصيل كل سلك إلى إبرة ناقلة في القابس أو المقبس بإدخال السلك داخل الإبرة الناقلة وتلحيم السلك مع الإبرة. تُعطى أشكال كافة هذه الموصلات في الشكل (5.3).



تابع الشكل (5.3): أشكال الموصلات المختلفة.

4.1.3 رموز الموصلات والأسلاك والكوابل

يبيِّن الشكل 6.30) رموز الأسلاك والكوابل وكذلك رموز الموصلات.

5.1.3 تأثيرات الترددات العالية ضمن الأسلاك والكوابل

الأثر الجلدي

عند التعامل مع تيارات وجهود مستمرة فإن الأسلاك والكوابل تكون بسيطة وتعمل كنواقل للتيارات الكهربائية وتكون مقاومتها للتيار قريبة من الصفر. ولكن عند استبدال التيارات والجهود المستمرة بتيارات وجهود متناوبة ذات ترددات عالية جداً فإن مجموعة من الظواهر المترابطة تحدث ضمن الأسلاك وهذه الظواهر تجعل التعامل مع الأسلاك كنواقل بسيطة غير ممكن عند العمل على ترددات عالية جداً. دعنا الآن ننظر بدقة إلى ما يجري ضمن الناقل عند مرور تيار مستمر عبره. في الشكل (7.3) نبيِّن ناقلاً (مكبراً) موصولاً مع مصدر جهد مستمر ويؤدي ذلك إلى تدفق الإلكترونات عبر السلك بنفس الطريقة التي يتدفق فيها الماء عبر الأنبوب، وهذا يعني أن مسار الإلكترون ضمن الناقل يمكن أن يكون في أي مكان داخل مادة الناقل (كأن يكون الإلكترون في المركز، أو في الوسط أو في قطر الناقل أو على السطح).

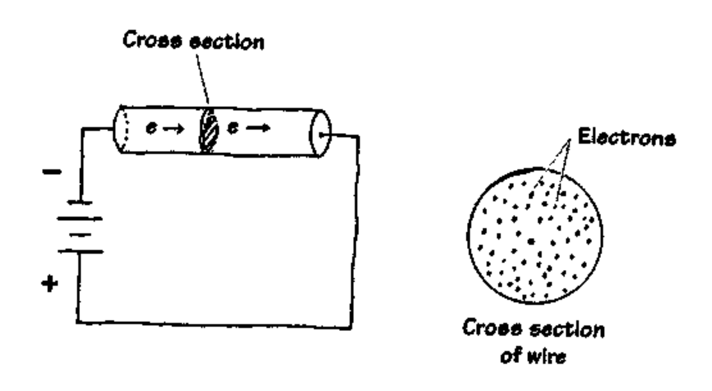
Wiring

Terminal
Shielded wire
Shielded 2-conductor cable
Crossed conductors (no contact)
Shield
Enclosure
2-conductor cable
Coaxial cable
Connected conductors

Connectors

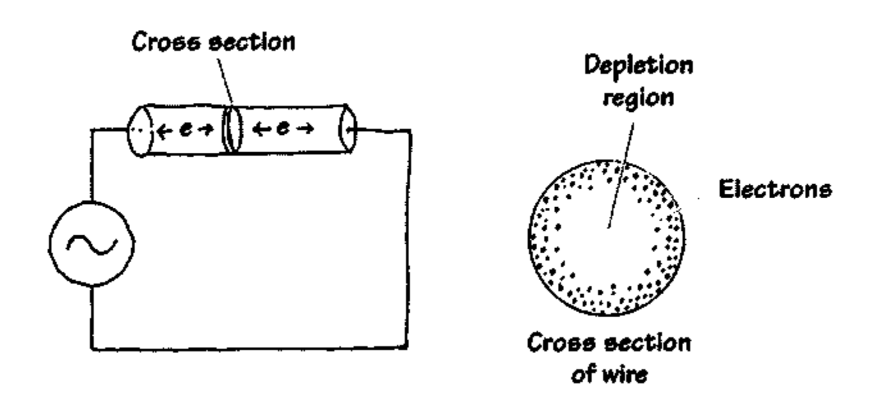
Common connections
Male
Female
Contacts
Plug
Jack
Coaxial connectors
Tip
Sleeve
Ring
2-conductor plug
3-conductor plug
2-conductor non-shorting jack
2-conductor shorting jack
SPST switch
DPST switch
3-conductor jacks
Ground
117-volt nonpolarized plug
117-volt nonpolarized socket
Hot
Neutral
117-volt polarized plug
117-volt polarized socket
234-volt plug
234-volt socket

الشكل (6.3): رموز الأسلاك والموصلات.



الشكل (7.3): جريان الإلكترونات في مقطع ناقل عند مرور تيار مستمر عبره.

والآن نناقش ما يجري داخل الناقل عند مرور تيار بتردد عال جداً داخل الناقل، فعند تطبيق جهد متناوب على ناقل كما في الشكل (8.3) فإن إلكترونات الناقل سوف تهتز إلى الأمام والخلف، وتولد الإلكترونات عند اهتزازها حقلاً مغناطيسياً. وبتطبيق بعض المبادئ الفيزيائية (إيجاد القوى التي تؤثر على كل إلكترون والناتجة عن جمع كافة القوى المغناطيسية المتولدة عن كافة الإلكترونات) نجد أن الإلكترونات تُدفع باتجاه سطح الناقل وكلما زاد تردد التيار كلما دفعت الإلكترونات أكثر باتجاه السطح مبتعدة عن المركز، وبذلك يصبح مركز الناقل مجرداً (devoid) من الإلكترونات الناقلة.



الشكل (8.3): ظاهرة الأثر الجلدي للتيار.

تسمى حركة الإلكترونات باتجاه سطح الناقل عند مرور تيار بتردد عالٍ جداً عبر الناقل باسم ظاهرة الأثر الجلدي. في مجال الترددات المنخفضة لا يكون للأثر الجلدي أي تأثير على ناقلية (conductivity) أو مقاومة (resistance) السلك، ولكن بزيادة التردد فإن مقاومة الناقل تتأثر بالتردد بشكلٍ واضح، ويبيِّن الجدول (2.3) تأثير ظاهرة الأثر الجلدي على مقاومة الناقل بزيادة التردد لمجموعة من الأسلاك ذات المعايير المختلفة وفي الجدول ترى النسبة (Rac/Rdc) أي نسبة مقاومة الناقل عند الترددات العالية (Rac) إلى مقاومة الناقل عند مرور تيار مستمر عبره (Rdc).

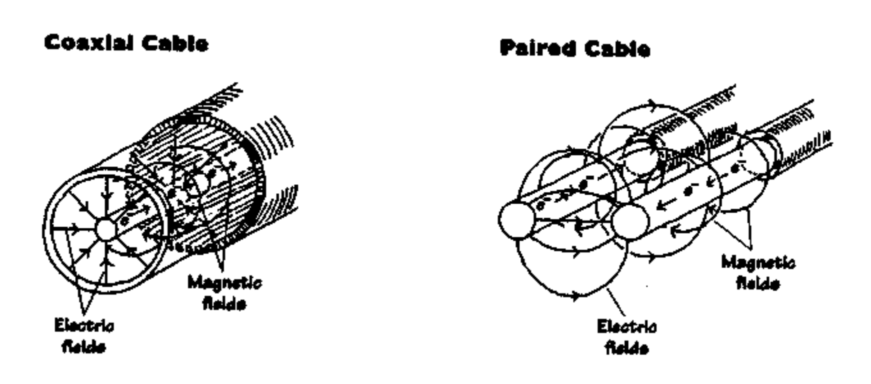
الجدول (2.3): نسبة المقاومات كتابع للتردد.

WIRE GAUGE	RAC\RDC			
	10^6 Hz	10^7 Hz	10^8 Hz	10^9 Hz
22	6.9	21.7	68.6	217
18	10.9	34.5	109	345
14	17.6	55.7	176	557
10	27.6	87.3	276	873

يمكن تخفيض مقاومة السلك بتأثير ظاهرة الأثر الجلدي باستخدام ناقل مكون من مجموعة أسلاك شعرية لأن السطح الكلي لمجموعة الأسلاك الشعرية ضمن الناقل أكبر من مساحة سطح سلك ذي ناقل صلب وحيد له نفس القطر.

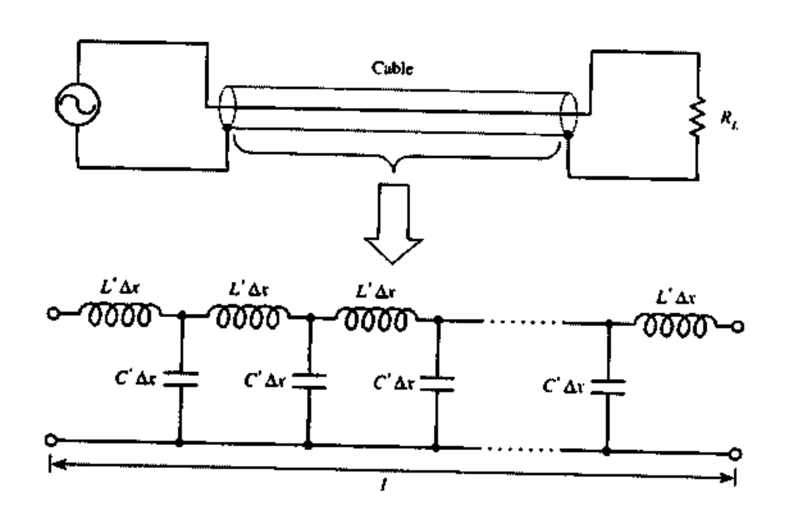
السلوك المتداخل في الكوابل

تظهر ظاهرة الأثر الجلدي في الكوابل، كما أن الكوابل تبدي آثاراً تحريضية وسعويّة وهذه الآثار تنتج عن حقول كهربائية ومغناطيسية ضمن الكابل. إنّ الحقل المغناطيسي الذي ينتجه التيار المار في أحد الأسلاك يحرّض تياراً في السلك الآخر. وبطريقة مماثلة، إذا كان هناك سلكان في كابل وكان هناك فرق في الشحنة بينهما، فإن حقلاً كهربائياً يتولد بسبب ذلك وبوجود الحقل ينشأ الأثر السعوي (capacitive effect) بين الناقلين. يُعامل الكابل بسبب الأثر السعوي والأثر التحريضي كما لو أنه مكون من عدد من الملفات والمكثفات الموصولة مع بعضها كما في الشكل (10.3). في الشكل (9.3) تُعطى أشكال الحقول الكهربائية والمغناطيسيّة التي تتكون في كابل محوري وفي كابل مكون من زوج من النواقل.



الشكل (9.3): الحقول الكهربائية والمغناطيسيّة في كابل محوري وكابل ذي زوج من النواقل.

يُوضح الشكل (10.3) النموذج الكهربائي المكافئ للكابل.



الشكل (10.3): الدارة الكهربائية المكافئة للكابل وهي مكونة من ملفات ومكثفات.

تستخدم طريقة اختزال لتبسيط الدارة الكهربائية المكافئة للكابل، حيث نفترض أن الخط عبارة عن سلّم (ladder) لا نهائي من الملفات والمكثفات ثم نفترض بأن إضافة حلقة إلى هذا السلم (أو مقطع مكوّن من ملف ومكثف) لا تؤثر على الممانعة الكلية Z للكابل وهذا يعني رياضياً أننا نستطيع أن نكتب:

Z = Z + (ممانعة مقطع LC)

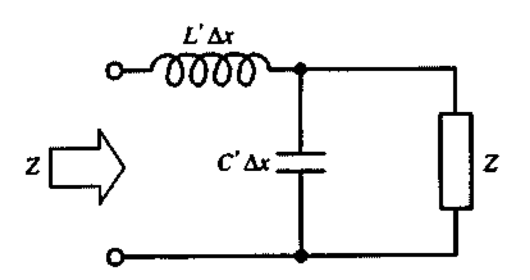
تُحل هذه المعادلة بالنسبة لـ Z وبعد ذلك نوجد النهاية بفرض أن المقدار ΔX ينتهي إلى الصفر وفي الشكل (11.3) نبيِّن العلاقات الرياضية والدارة المكافئة:

$$Z = j\omega L'\Delta X + \frac{\frac{Z}{j\omega C'\Delta X}}{Z + 1/j\omega C'\Delta X} = j\omega L'\Delta X + \frac{Z}{1 + j\omega C'\Delta X}$$

عندما ينتهي ΔX إلى الصفر ($\Delta X \to 0$) نجد أن:

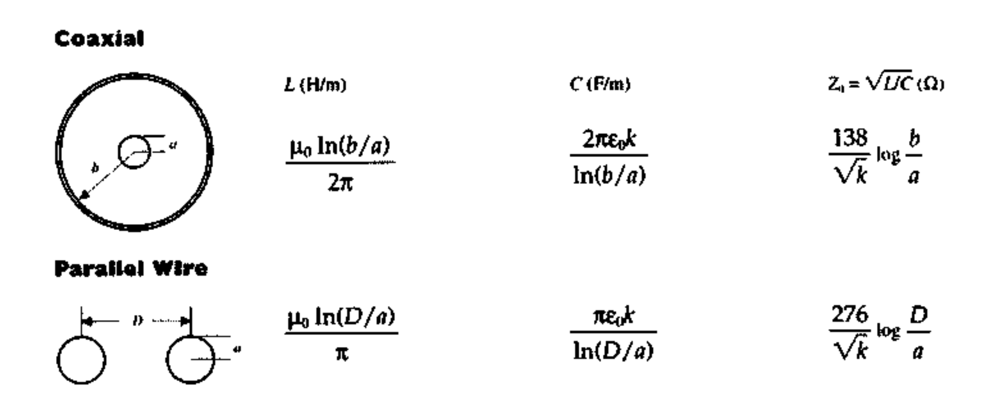
$$Z = \sqrt{L'/C'} = \sqrt{\frac{L/l}{C/l}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

تسمى ممانعة الكابل باسم الممانعة المميِّزة (characteristic impedance) ويُرمز لها بالرمز (Z_0). لاحظ أن الممانعة المميِّزة هي عبارة عن عدد حقيقي (real number)، وهذا يعني أن الكابل يبدو بالنسبة لمنبع الإشارة كمقاومة على الرغم من أننا قد فرضنا أنه يتكون من ملفات ومكثفات.



الشكل (11.3): الدارة الكهربائية المكافئة لكابل.

وعلى الرغم من أن الكابل له سلوك مشابه للمقاومة إلا أنه يبقى التساؤل المشروع ما هي L وC؟ تتعلق قيم L وC في معادلة الممانعة للكابل بالبنية الهندسية الخاصة للأسلاك ضمن الكابل وبنوع العوازل المستخدمة بين الأسلاك ويمكن إيجاد قيم (L) و(C) باستخدام بعض المبادئ الفيزيائية، وطبعاً لن نقوم هنا بهذا العمل بالتفصيل وإنما سنعطيك الحل مباشرةً ففي الشكل (12.3) تُعطى معادلات (L) و(C) و(Z_0) لكابل محوري ولكابل فيه زوج من الأسلاك.



الشكل (12.3): معادلات السعة والتحريضية والممانعة المميزة لكابل محوري ولكابل فيه زوج من الأسلاك.

ونتعرف فيما يلي على دلالات بعض الرموز المستخدمة في هذه المعادلات

K: ثابت عازلية العازل المستخدم (dielectric constant).

$\mu_0 = 1.256 \times 10^{-6}$ H/m: هو ثابت نفاذية أو قبولية (Permeability) الفراغ الحر (free space).

$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m: ثابت السماحية (permittivity) للفضاء الحر.

تُعطى في الجدول (3.3) بعض المواد العازلة شائعة الاستخدام مع ثوابتها.

غالباً يتم إعطاء السعة على القدم (capacitance per foot) وكذلك التحريضية على القدم (inductance per foot) من قبل الجهات الصانعة للكوابل وفي هذه الحالة يمكن تعويض القيم المعطاة في معادلة الممانعة المميزة للكابل $Z = \sqrt{L/C}$ فتحصل على قيمة الممانعة المميزة للكبل الذي تتعامل معه.

الجدول 3.3: بعض المواد العازلة شائعة الاستخدام وثوابتها.

MATERIAL	DIELECTRIC CONSTANT (K)
Air	1.0
Bakelite	4.4-5.4
Cellulose acetate	3.3-3.9
Pyrex glass	4.8
Mica	5.4
Paper	3.0
Polyethylene	2.3
Polystyrene	5.1-5.9
Quartz	3.8
Teflon	2.1

أما في الجدول (4.3) فتعطى قيم السعة في القدم والتحريضية في القدم لبعض أنواع الكوابل.

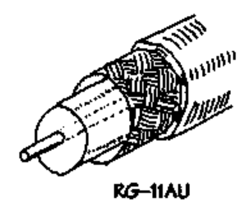
الجدول 4.3: السعة في القدم والتحريضية في القدم لبعض انواع الكوابل.

CABLE TYPE	CAPACITANCE/FT	INDUCTANCE/FT
RG-8A/U	29.5	0.083
RG-11A/U	20.5	0.115
RG-59A/U	21.0	0.112
214-023	20.0	0.107
214-076	3.9	0.351

مسائل حول إيجاد الممانعة المميزة لكابل

مثال (1)

كابل من نوع RG-11AU له سعة تساوي (21 PF/ft) وتحريضية تساوي (0-112 µH/ft) ما هي ممانعته المميِّزة.



الشكل (13.3): كابل RG-11AU

الحل:

أعطيت قيم السعة والتحريضية لواحدة الطول من الكابل C' = C/ft وL' = L/ft وباستخدام معادلة (Z_0) تحصل على:

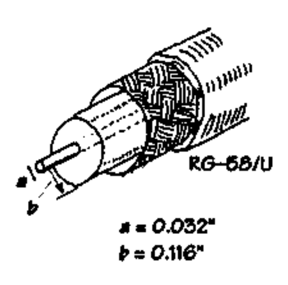
$$Z_0 = \sqrt{L/C} = \sqrt{\frac{0.112\times10^{-6}}{21.0\times10^{-12}}} = 73\Omega$$

مثال (2)

احسب الممانعة المميزة لكابل محوري RG-58/U يُستخدم فيه عازل من البولي ايثيلين (polyethylene) له (K = 2.3) والكابل مبيَّن في الشكل (14.3).

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{K}} Log\frac{b}{a}$$

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{2.3}} Log\left(\frac{0.116}{0.032}\right) = 91\times0.056 = 51\Omega$$

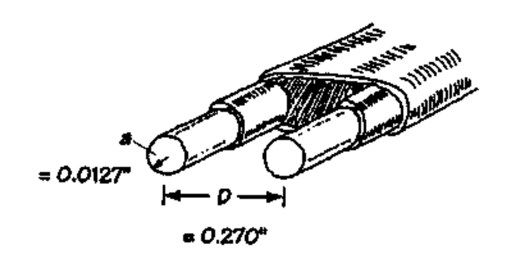


الشكل (14.3): كابل المثال الثاني.

مثال (3)

أوجد الممانعة المميزة للكابل المبيَّن في الشكل (15.3) والمكون من سلكين متوازيين. يستخدم في هذا الكابل عازل من البولي ايثيلين له K = 2.3

$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{K}} Log\frac{D}{a} = \frac{276}{\sqrt{2.3}} Log\frac{0.270}{0.0127} = 242\Omega$$



الشكل (15.3): كابل المثال الثالث.

تلاؤم (توافق) الممانعة

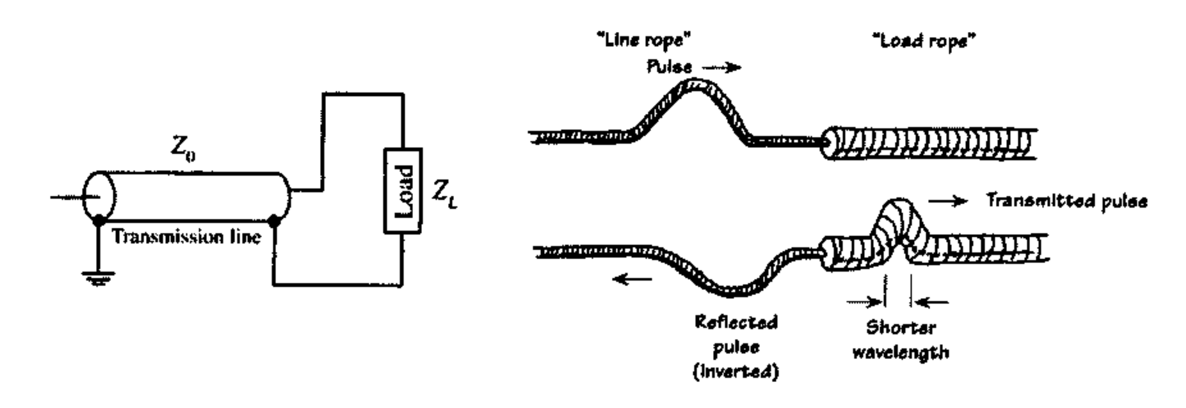
بما أن خط النقل له ممانعة مميزة ضمنية (built in impedance)، فإنّ السؤال الطبيعي الذي يُسأل هو: كيف تؤثر الممانعة على الإشارة التي تُنقل عبر خط النقل من جهاز إلى آخر. ويعتمد الجواب النهائي لهذا السؤال على ممانعة الجهاز الذي يوصل إلى الطرف الآخر لخط النقل. إذا كانت ممانعة الجهاز الموصول مع نهاية خط النقل، أو بشكل عام إذا كانت ممانعة الحمل الموصول إلى نهاية خط النقل لا تساوي الممانعة المميِّزة لخط النقل، فإن الإشارة المنتشرة (propagating) عبر خط النقل تُمتص جزئياً من الحمل، أما الجزء الذي لا يمتصه الحمل من الإشارة فإنه ينعكس إلى الجهة التي ورد منها. تعتبر الإشارات المنعكسة (reflected signals) أمراً سيئاً في الإلكترونيات، وهي تعبر عن عدم كفاءة في نقل القدرة (power transfer) بين الأجهزة الإلكترونية. من أجل التخلص من الانعكاسات تستخدم طريقة تسمى طريقة تلاؤم الاستطاعة أكبر لضمان الأمان أثناء العمل. تتوفر عادة مقاومات بمعدلات استطاعة (1/8 W)، أو (1/4 W)، أو (1 خاصة تسمى دارات توافق الممانعة بين الجهازين.

وقبل دراسة الطرق والدارات الخاصة المستخدمة لتحقيق توافق الممانعات، سندرس حالة مشابهة تسلط بعض الضوء على السبب الذي يجعل الممانعات غير المتوافقة تؤدي إلى نشوء موجات منعكسة فتقلل من مردود عملية نقل القدرة. افرض أن لديك حبل أول مصنوع من مادة لها كثافة معينة وأن هذا الحبل موصول من طرفه البعيد مع قطعة حبل ثانٍ ولكن من مادة ذات كثافة مغايرة لكثافة الحبل الأول.

سنعتبر أنّ كثافة مادة الحبل الأول تقابل الممانعة المميِّزة للكابل (Z_0) وأن كثافة قطعة الحبل الثاني تقابل ممانعة الحمل (Z_L)، وسنناقش سلوك قطعتي الحبل في الحالات التالية:

الممانعات غير متوافقة ($Z_0 < Z_L$)

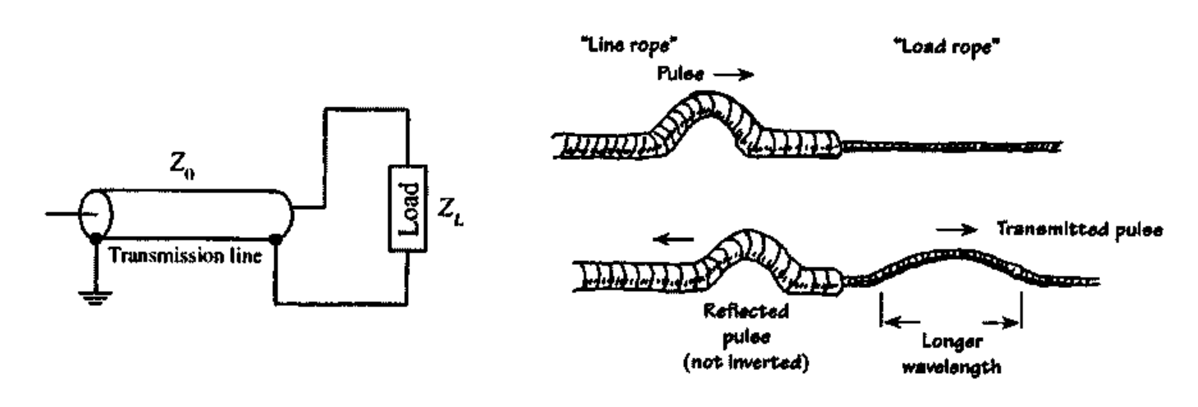
تعني هذه الحالة أن خط نقل ذا ممانعة مميِّزة منخفضة موصول إلى ممانعة حمل عالية ($Z_0 < Z_L$)، وهذه الحالة تشابه حبلاً أول ذا كثافة قليلة موصولاً مع حبل ثان ذي كثافة أعلى. إذا خلقت موجة (اهتزازة) في طرف الحبل قليل الكثافة، فإن هذه الموجة سوف تنتقل عبر الحبل الأولّ حتى تصل إلى الحبل الثاني الأعلى كثافة وعندها وحسب قوانين الفيزياء فإنها تولد موجة أقصر في الحبل الأعلى كثافة إضافة إلى موجة ذات مطال أقل ولها نفس الطول ولكنها تعود عبر الحبل الأول إلى الطرف الذي جاءت منه الموجة الأصلية، وهنا تلاحظ أن جزءاً من طاقة الموجة الأساسية قد نُقلَ إلى الحبل الثاني. ومن ذلك تستطيع أن تستنتج أن نفس التأثيرات سوف تحدث في الدارة الكهربائية ولكنك تتعامل في الدارة الكهربائية مع جهود وتيارات وخط نقل وحمل بدلاً من الحبال والموجة الاهتزازيّة فالحبل الأول يقابل الكابل والحبل الثاني يقابل الحمل والموجة التي تم توليدها في طرف الحبل الأول تقابل مولد الإشارة أو منبعها.



الشكل (16a.3): خط نقل موصول إلى حمل ($Z_0 < Z_L$).

الممانعات غير متوافقة ($Z_0 > Z_L$)

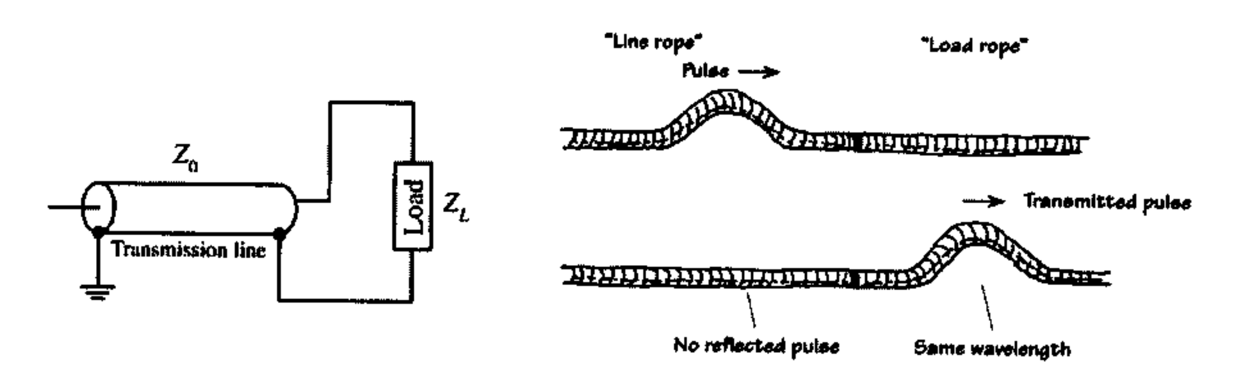
هنا يوصل خط نقل له ممانعة مميزة (Z_0) مع حمل له ممانعة (Z_L) ولكن (Z_0) أكبر من (Z_L). الحبل الأول في هذه الحالة يكون عالي الكثافة أما الحبل الثاني فيكون قليل الكثافة. بتوليد موجة في الطرف اليسار للحبل الأول نلاحظ أن هذه الموجة تنتقل عبر الحبل الأول حتى تصل إلى الحبل الثاني وعند ذلك تقوم هذه الموجة بتوليد موجة أطول في الحبل الثاني وتولد موجة مشابهة وبمطال أقل في الحبل الأول وتعود هذه الموجة إلى الطرف اليساري، وهنا أيضاً نلاحظ أن جزءاً من قدرة الموجة الأساسية المتقدمة عبر الحبل الأول ينتقل إلى الحبل الثاني. الموجة المولدة في الحبل والمنتقلة عبره تشبه إشارة كهربائية تنتقل عبر كابل له (Z_0) أكبر من ممانعة الحمل الموصول معه (Z_L).



الشكل (16b.3): حمل موصول إلى خط نقل $Z_0 < Z_L$.

الممانعات متوافقة $Z_0 = Z_L$

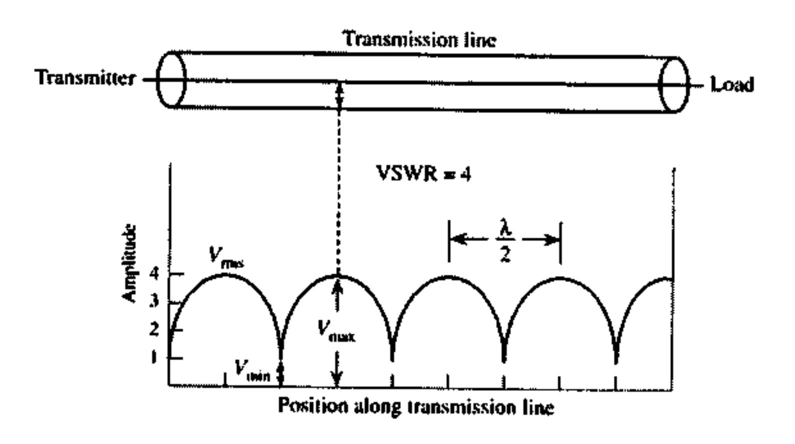
يوصل في هذه الحالة خط نقل له ممانعة مميزة (Z_0) مع حمل Z_L وممانعة الكبل المميزة تساوي ممانعة الحمل ($Z_0 = Z_L$)، وهذه الدارة الكهربائية تشبه وصل قطعتي حبل لهما نفس الكثافة مع بعض. عند توليد موجة في الطرف اليساري للحبل الأول نلاحظ أن الموجة تنتقل عبره وعندما تصل إلى الحبل الثاني فإنها تتابع التقدم عبره ولا يحدث انعكاس ولا يحدث تغيُّر في طول الموجة ولا في مطالها، ومن ذلك نستنتج أنه إذا كانت الممانعات في الدارة الكهربائية متوافقة فإن عملية نقل القدرة تكون بمردودٍ عالٍ ودون انعكاسات.



الشكل (16c.3): حمل موصول إلى خط نقل $Z_L = Z_0$.

الأمواج المستقرة

سندرس الآن الظاهرة التي تحدث عند وصل خط نقل إلى حمل دون أن يكون هناك توافق بين ممانعة الحمل وممانعة خط النقل وذلك عندما يقوم منبع إشارة الدخل بتوليد سلسلة متتابعة ودائمة من الأمواج الجيبيّة.
تتقدم أو تنتشر هذه الأمواج عبر خط النقل وعند وصولها إلى الحمل تحدث انعكاسات بسبب عدم التوافق بين الممانعات، ولكن يُلاحظ أيضاً تشكل ما يُسمى موجة مستقرة (standing wave) ضمن الخط وتنتج هذه الموجة المستقرة عن التأثير المتبادل للموجة الواردة (forward-going) وللموجة المنعكسة (reflected). يبيِّن الشكل (17.3) موجة مستقرة في خط نقل غير متوافق مع الحمل والخط موصول بين الحمل ومولد إشارة جيبيّة، وفي الشكل رُسم مطال الموجة المستقرة كتابع للمسافة على خط النقل.



الشكل (17.3): أمواج مستقرة في خط نقل غير متوافق مع الحمل.

تُعرَّف نسبة الأمواج المستقرة الجهدية (voltage standing wave ratio-VSWR) على أنها نسبة القيمة العظمى للجهد الفعال (rms) إلى القيمة الصغرى للجهد الفعال على طول خط النقل وتعطى بالعلاقة:

$$VSWR = \frac{V_{rms,max}}{V_{rms,min}}$$

وتستخدم هذه النسبة لوصف الأمواج المستقرة في خط النقل.

الأمواج المستقرة المبينة في الشكل (17.3) لها:

$$VSWR = \frac{4}{1} = 4$$

وبما أن الأمواج المستقرة ناتجة بالكامل بسبب عدم التوافق بين الحمل والممانعة المميزة لخط النقل، عندها يمكن أن نكتب العلاقة التالية:

$$VSWR = \frac{Z_0}{Z_L}$$

أو

$$VSWR = \frac{Z_L}{Z_0}$$

ونختار من هاتين العلاقتين العلاقة التي تعطي قيمة أكبر من الواحد.

إذا كان VSWR = 1 فإن ذلك يعني أن خط النقل محمل بممانعة تساوي ممانعته المميِّزة (properly terminated) ولا توجد أمواج منعكسة. أما إذا كان VSWR أكبر من الواحد فإن الخط يكون غير محمل بممانعة تساوي ممانعته المميزة (improperly terminated) (كمثال، إذا وُصل خط منخفض الممانعة أو عديم الممانعة إلى دارة قصر أو دارة مفتوحة) وتحدث انعكاسات شديدة. يمكن التعبير عن نسبة الأمواج المستقرة الجهدية VSWR بدلالة الأمواج الواردة والمنعكسة (forward and reflected waves) باستخدام العلاقة التالية:

$$VSWR = \frac{V_F + V_R}{V_F - V_R}$$

ومن أجل جعل هذه المعادلة أكثر فائدة تكتب بدلالة الاستطاعة الواردة والاستطاعة المنعكسة.

$$P = I.V = \frac{V^2}{R}$$

وبذلك يمكن كتابة VSWR بدلالة الاستطاعة الأمامية (الواردة forward) والاستطاعة المنعكسة كما يلي:

$$VSWR = \frac{\sqrt{P_F} + \sqrt{P_R}}{\sqrt{P_F} - \sqrt{P_R}}$$

ومن هذه العلاقة يمكن الحصول على النسبة المئوية للاستطاعة المنعكسة وكذلك على النسبة المئوية للاستطاعة الممتصة (absorbed power) بدلالة VSWR:

$$\%reflected\ power = \frac{P_R}{P_F} \times 100\% = \left[\frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}\right]^2 \times 100\%$$

% absorbed power = 100% - % reflected power

مثال (VSWR):

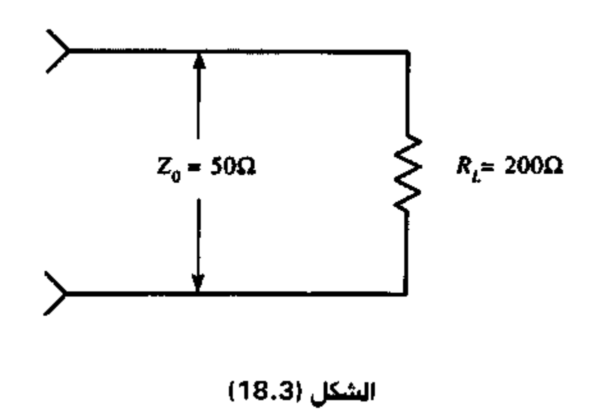
أوجد نسبة الأمواج المستقرة الجهدية VSWR لخط ممانعته (50 Ω) محمل بـــ 200 Ω وأوجد النسبة المئوية للاستطاعة المنعكسة عن الحمل والنسبة المئوية للاستطاعة التي يمتصها الحمل.

$$VSWR = \frac{20}{R_L} = \frac{200}{50} = 4$$

$$VSWR = 4 : 1$$

$$\%\ reflected\ power = \left[\frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}\right]^2 \times 100\% = \left(\frac{4-1}{4+1}\right)^2 \times 100\% = 36\%$$

$$\%\ absorbed\ power = 100\% - \%\ reflected\ power = 64\%$$



الشكل (18.3)

تقنيات توافق الممانعات

سنتعرف في هذه الفقرة على بعض طرق تلاؤم الممانعات، وكقاعدة عامة عند التعامل مع ترددات منخفضة، أي عندما يكون طول الموجة أكبر بكثير من طول الكابل، فلا حاجة لتحقيق توافق في الممانعات. إن أغلب الأجهزة الكهربائية كرواسم الإشارة، وأجهزة الفيديو وغيرها لها ممانعات دخل وخرج تتوافق مع الممانعة المميزة للكوابل المحورية (عادة 50 Ω). أما الأجهزة الأخرى كمداخل هوائيات التلفزيون فإن لها ممانعات دخل تتوافق مع الممانعة المميزة لكابل فيه زوج من النواقل (Twin-Lead cables) وهي (300 Ω) وعند وصل الهوائي مع خط نقل ممانعته المميزة 300 Ω يكون التوافق في الممانعات محققاً.

دارات (شبكات) توافق الممانعة

يبيّن الشكل (19.3) طريقة عامة لتحقيق توافق الممانعات، ومن أجل ذلك يتم اختيار قيم (R_1) و(R_2) من العلاقات التالية:

$$R_1 = \sqrt{Z_2(Z_2 - Z_1)}$$

$$R_2 = Z_1\sqrt{Z_2(Z_2 - Z_1)}$$

سيكون التخامد الذي يحسب من طرف Z_1 مساوياً:

$$A_1 = R_1/Z_2 + 1$$

أما التخامد attenuation المحسوب من طرف Z_2 فسوف يكون:

$$A_2 = R_1/R_2 + R_1/Z_1 + 1$$

مثال:

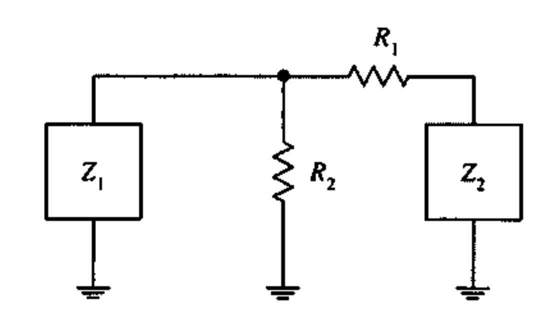
إذا كان $Z_1 = 50\ \Omega$ و $Z_2 = 125\ \Omega$ فإن قيم R_1، R_2 و A_1 و A_2 ستكون:

$$R_1 = \sqrt{Z_2(Z_2 - Z_1)} = \sqrt{125(125 - 50)} = 96.8\Omega \cong 97\Omega$$

$$R_2 = Z_1\sqrt{\frac{Z_2}{Z_2 - Z_1}} = 50\sqrt{\frac{125}{125 - 50}} = 64.6\Omega \cong 65\Omega$$

$$A_1 = \frac{R_1}{Z_2} + 1 = \frac{96.8}{125} + 1 = 1.77$$

$$A_2 = \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{Z_1} + 1 = \frac{96.8}{64.6} + \frac{96.8}{50} + 1 = 4.43$$



الشكل (19.3): دارة عامة لتحقيق توافق الممانعة.

محول الممانعة

في هذه الطريقة يتم استخدام محول transformer من أجل تحقيق توافق بين الممانعة المميزة للكابل مع ممانعة الحمل، واعتماداً على العلاقة

$$\frac{N_P}{N_S} = \sqrt{\frac{Z_0}{Z_L}}$$

يمكن تحقيق توافق الممانعات بالاختيار المناسب لعدد لفات الطرف الابتدائي من المحول (N_P) وكذلك عدد لفات الطرف الثانوي (N_S) بحيث تكون نسبة عدد اللفات (N_P/N_S) مساوية جذر نسبة الممانعات $\sqrt{\frac{Z_0}{Z_L}}$.

وكمثال إذا أردت تحقيق توافق بين كابل ممانعته المميزة 800 Ω مع حمل ممانعته 8 Ω، عليك حساب نسبة الممانعات وجذر هذه النسبة أو:

$$\sqrt{\frac{Z_0}{Z_L}} = \sqrt{\frac{800}{8}} = 10$$

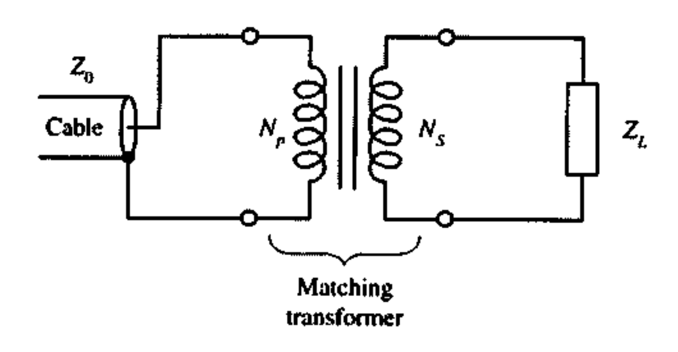
إذن يجب أن يكون:

$$\frac{N_P}{N_S} = 10 \Rightarrow N_P = 10N_S$$

إذا كان $N_S = 1$ فإن $N_P = 10$ أو:

$N_S = 2$ فإن $N_S = 20$

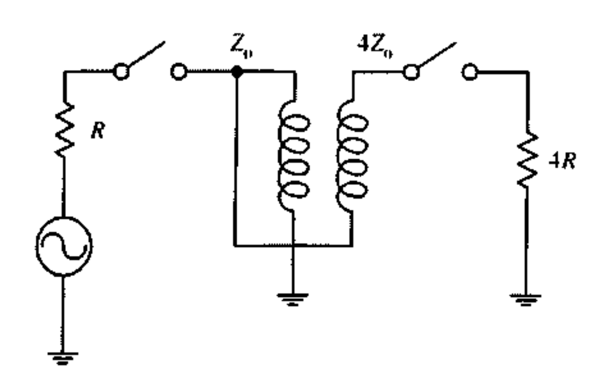
وكلا الحالتين تعطيان نفس النتيجة بالنسبة لتوافق الممانعات.



الشكل (20.3): استخدام المحول لتوفيق الممانعات.

محول عريض الحزمة مكون من خطوط نقل

إن المحول عريض الحزمة المصنوع من خط نقل هو عبارة عن أداة بسيطة تتكون من عدة لفات من كابل محوري أو من كابل مكون من زوج من الأسلاك المجدولة. تُلف اللفات حول نواة من الفريت (ferrite core). وبعكس المحول التقليدي المعروف، فإن هذا المحول يُستخدم في تحقيق التوافق على الترددات العالية (لأن بنيته الهندسية تلغي السلوك الطنيني السعوي والتحريضي). يمكن بواسطة هذا النوع من المحولات تحقيق توافق لممانعات مختلفة وضمن عرض حزمة عريض جداً (أقل من 1 dB تخميد وفي مجال يمتد من 0.1 وحتى 500 MHz).



الشكل (21.3): محول عريض الحزمة مكوّن من خط نقل.

تأمين التلاؤم باستخدام قطعة من خط نقل بطول ربع موجة

يمكن تأمين التلاؤم (التوافق) في الممانعة بين خط نقل ممانعته المميزة (Z_0) وحمل ممانعته (Z_L) بوصل قطعة من خط نقل طولها يساوي ربع طول موجة الإشارة التي يتم نقلها من المصدر إلى الحمل، وهذه القطعة من الخط توصل بين الكابل الذي ممانعته (Z_0) وبين الحمل وبشرط أن تكون الممانعة المميزة لقطعة خط النقل تحقق المعادلة التالية:

$$Z_{sec} = \sqrt{Z_0 Z_L}$$

ومن أجل حساب طول القطعة اللازمة عليك حساب (λ) طول الموجة من العلاقة ($\lambda = v/f$) حيث (v) هي سرعة انتشار الموجة عبر الكابل وf هو تردد الإشارة. لإيجاد v استخدم العلاقة:

$$v = c / \sqrt{K}$$

$C = 3 \times 10^8$ m/S: سرعة الضوء.

K: ثابت العازلية للكابل المستخدم.

وكمثال افرض أنه طلب منك تحقيق تلاؤم بين كابل ممانعته المميزة (50 Ω) وبين حمل ممانعته (200 Ω) بفرض أن ثابت العازلية للكابل $K = 1$، وتردد الإشارة 100 MHz، عندها عليك أن تحسب طول الموجة من العلاقة:

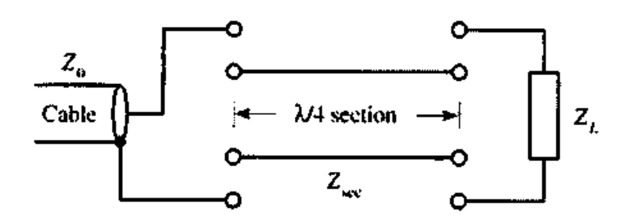
$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{C/\sqrt{K}}{f} = \frac{(3 \times 10^8 / 1)}{100 \times 10^6} = 3\text{m}$$

وطول قطعة الكبل التي يجب أن توصلها بين الحمل وخط النقل (الكابل) هي:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{3}{4} = 0.75\text{m}$$

أما ممانعة هذا الكبل المميزة فيجب أن تكون:

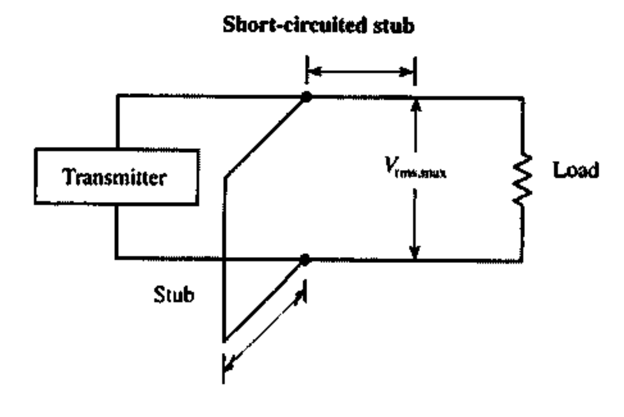
$$Z_{sec} = \sqrt{Z_0 Z_L} = \sqrt{(50)(200)} = 100\Omega$$

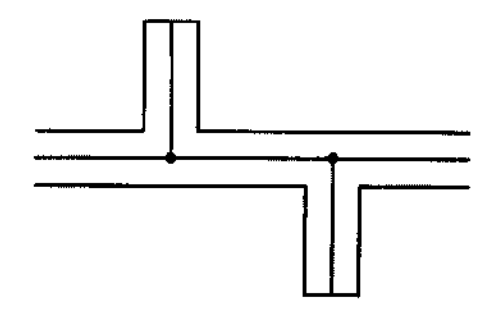


الشكل (22.3): قطعة خط بربع طول الموجة.

استخدام الـ STUBS لتحقيق تلاؤم الممانعة

إن قطعة من خط نقل مفتوح النهاية أو مقصور النهاية تكافئ ممانعة ردّية (reactive)، فإذا تم اختيار طول القطعة المفتوحة النهاية أو المقصورة النهاية بشكل مناسب ووصلت هذه القطعة على التوازي مع خط النقل في موقع ما منه يؤدي إلى التخلص من الأمواج المستقرة (أي يحقق التوافق في الممانعة). تسمى قطعة خط النقل المقصورة النهاية، أو المفتوحة النهاية باسم (STUB)، أما الممانعة المميزة لخط النقل الذي نشكل منه الـ (STUB) فتساوي الممانعة المميِّزة لخط النقل الأساسي. من أجل معرفة طول قطعة الـ (STUB) وهل هي مقصورة أم مفتوحة النهاية وكذلك مكان وصلها على التوازي مع الكابل لابد من استخدام معادلات ومخططات عملية وهنا ننصح بالرجوع إلى المراجع المختصة حول هذا الموضوع، ونكتفي هنا بتعريفك بالفكرة فقط.



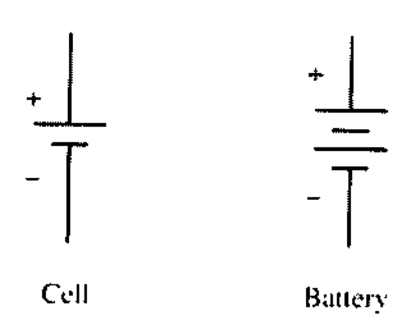


الشكل 23.3: تحقيق التوافق في الممانعات بواسطة STUB.

في القسم العلوي من الشكل نبيِّن دارة موافقة باستخدام STUB بنهاية مقصورة، وفي القسم السفلي بواسطة زوج من الـ STUB مفتوح النهايات.

2.3 البطاريات

تتكون البطارية من عدد من الخلايا (Cells). تحوي كل خلية طرفاً موجباً أو مهبطاً وطرفاً سالباً أو مصعداً، وتسمية أطراف (أقطاب) البطارية باسم مصعد ومهبط تخالف كافة العناصر الأخرى حيث يعتبر الطرف الموجب مصعداً إلا في البطاريات أما الطرف السالب فيسمى مهبطاً أما في البطاريات فبالعكس.

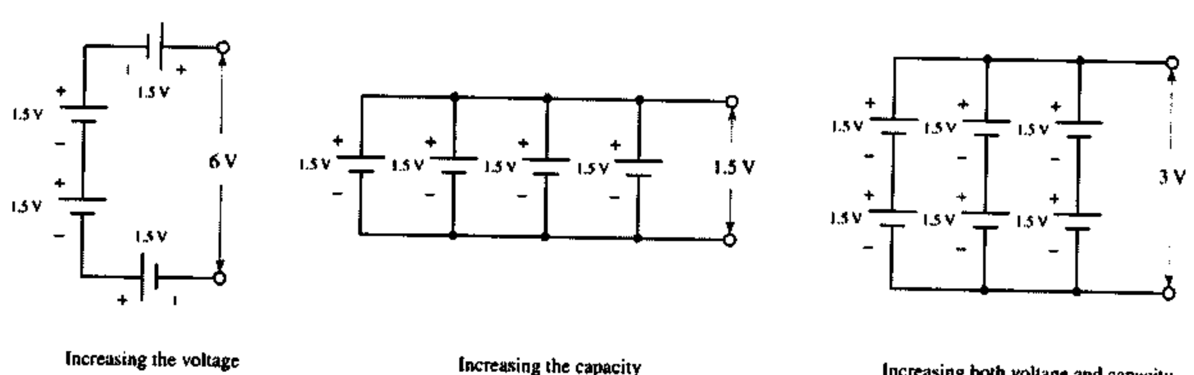


الشكل (24.3): رموز الخلية والبطارية.

عند وصل حمل بين طرفي خلية يتشكل جسر ناقل (conductive bridge) ويحفّز هذا الجسر الناقل تفاعلات كيميائية ضمن الخلية، وهذه التفاعلات تنتج إلكترونات في مادة المصعد وتزيل الإلكترونات من مادة المهبط.

وبنتيجة ذلك يتشكل جهد بين طرفي الخلية وتمر الإلكترونات من المصعد عبر الحمل إلى المهبط (وحركة الإلكترونات هذه تؤدي عمل).

الجهد النموذجي بين طرفي الخلية الواحدة يساوي (1.5 V) وأما تيار الخلية الذي تقدمه إلى الحمل فيختلف حسب حجم الخلية وحسب البنية الكيميائية لها. توصل مجموعة خلايا مع بعض وصلاً تسلسلياً أو تفرعياً حسب الحاجة لتشكيل بطارية بجهد نهائي وتيار معيَّن. عند وصل الخلايا على التسلسل يكون الجهد الكلي هو مجموع جهود الخلايا ونحصل على جهد أكبر أما عند وصل الخلايا على التفرع فإن التيار الكلي الذي تقدمه هذه الخلايا إلى الحمل هو مجموع تيارات الخلايا ونحصل على بطارية بتيار خرج أكبر. يبيِّن الشكل (25.3) وصل الخلايا على التسلسل والتفرع والوصل المختلط.



الشكل (25.3): وصل الخلايا على التسلسل لزيادة الجهد، على التفرع لزيادة التيار والوصل المختلط لزيادة الجهد والتيار.

تصنع الخلايا من عدد من المكونات الكيميائية ويتأثر الأداء الكلي للخلية بالمواد الداخلة في تركيبها، فمثلاً تصمم بعض الخلايا لتعطي جهد خرج مفتوح عالياً، أما بعضها الآخر فيصمم ليعطي تياراً عالياً.

تصمم أنواع خاصة من الخلايا بتيارات منخفضة للتطبيقات المتوسطة استهلاك التيار، أما بعضها الآخر فيصمم من أجل تيارات عالية وخاصة في التطبيقات الدائمة الاستهلاك. كذلك تصمم بعض البطاريات للتطبيقات النبضيّة حيث يُطلب من البطارية تأمين تيار عالٍ خلال فترة زمنية قصيرة. تمتاز بعض البطاريات بزمن حياة تخزين طويل أما بعض الأنواع فلا يمكن تخزينها لفترات طويلة مثل بطاريات النيكل كادميوم (nickel-cadmium) وبطاريات (Lead-acid)، البطاريات الرصاصية الحمضية والتي تُسمى بطاريات ثانوية (secondary batteries).

1.2.3 كيف تعمل الخلية

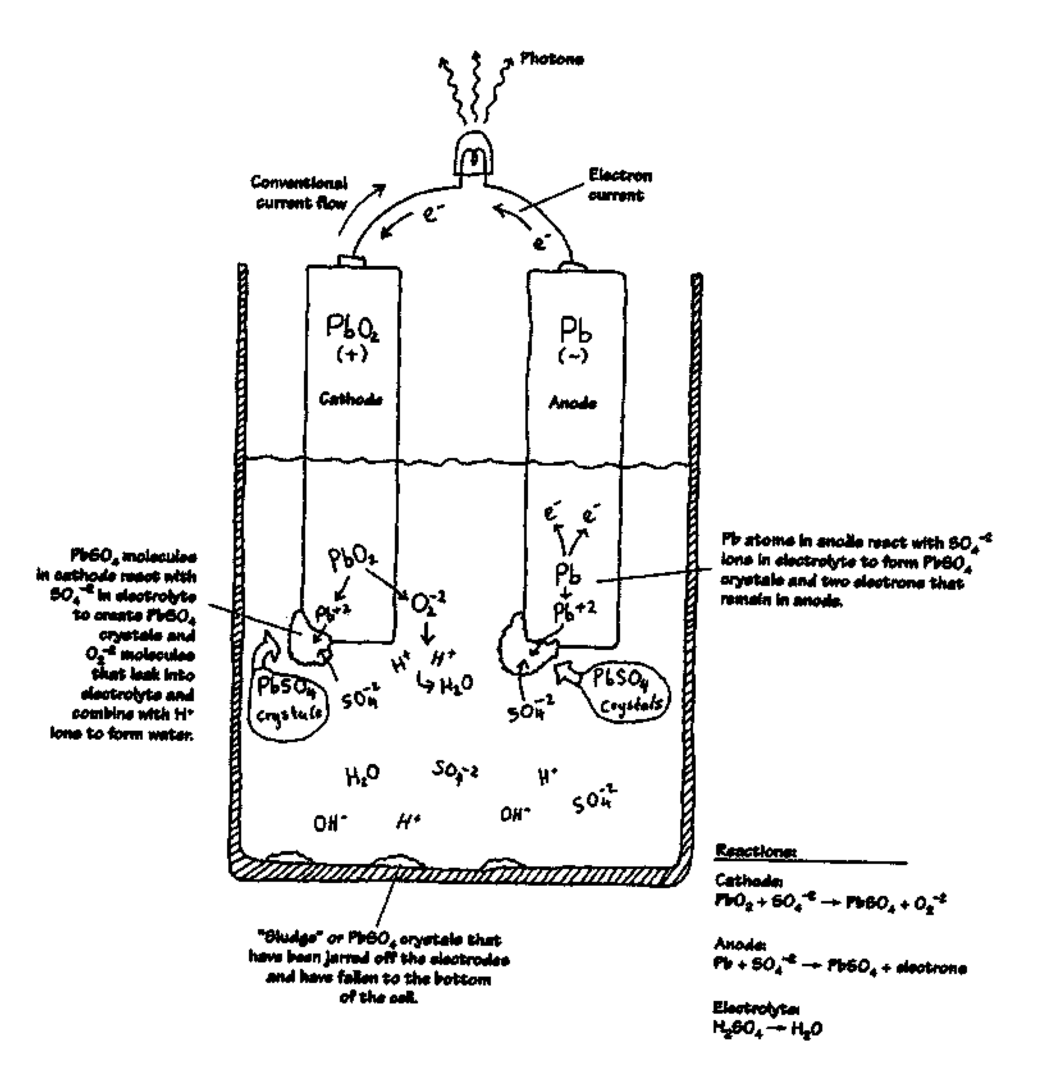
تحوِّل الخلية الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية عن طريق تفاعلات تخفيض الأكسدة (oxidation-reduction) وهي عبارة عن تفاعلات تتضمن تبادلاً بالإلكترونات، والمكونات الأساسية الثلاث التي تستخدم في الخلية لتحفيز هذا التفاعل هي معدنان غير متشابهين كيميائياً (الأقطاب الموجبة والسالبة) ومحلول كيميائي (electrolyte) وعادة يكون المحلول الكيميائي سائلاً Liquid أو معجوناً (pastelike material) يحتوي أيونات عائمة بحرّية. وفيما يلي نبيِّن باختصار مبدأ عمل خلية رصاصية حمضيّة.

في هذا النوع من الخلايا يكون أحد الأقطاب (electrodes) من الرصاص النقي (Pb)، أما القطب الآخر فيكون من أوكسيد الرصاص (PbO_2) أما المحلول الكيميائي فيكون محلول حمض الكبريت:

$$H_2O + H_2SO_4 \rightarrow 3H^+ + SO_4^{2-} + OH^-$$

عند وضع القطبين المختلفين كيميائياً مع محول حمض الكبريت تتفاعل الأقطاب مع الحمض (أيونات الحمض H^+ وSO_4^{2-})، ويؤدي ذلك إلى تحول القطب الرصاصي النقي إلى $PbSO_4$ (كبريتات الرصاص) وخلال هذا التفاعل النقلي (transformation reaction) تتحرر إلكترونات داخل القطب الرصاصي. إذا تفحصت القطب المكون من أوكسيد الرصاص تلاحظ أنه قد تحوَّل أيضاً إلى كبريتات الرصاص ($PbSO_4$) ولكن وبدلاً من تحريره إلكترونات خلال عملية التحول، فإنه يحرر أيونات (O_2^{2-}) وهذه الأيونات تتسرب خارجة من القطب إلى المحلول وتتحد مع أيونات الهيدروجين مكونة الماء (H_2O). عند وصل حمل (مصباح مثلاً) بين قطبي البطارية، تتدفق الإلكترونات من القطب الغني بالإلكترونات عبر فتائل المصباح (bulb's filament) إلى القطب الفقير بالإلكترونات وهو قطب أوكسيد الرصاص. ومع مرور الزمن تستهلك المكونات الضرورية في البطارية اللازمة لاستمرار التفاعل ونقول إن البطارية قد أصبحت مستنزفة.

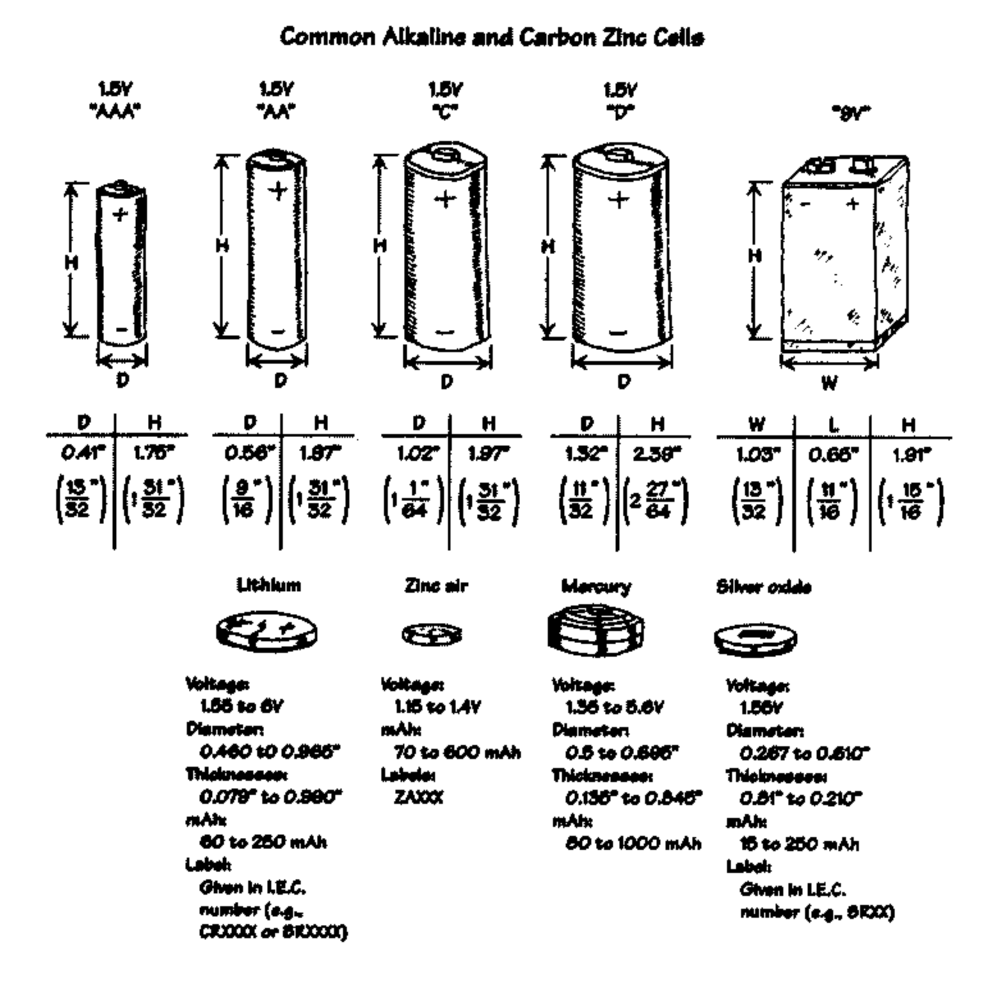
ولإعادة القدرة إلى البطارية يمكن تطبيق جهد عكسي عليها لأن الجهد العكسي يجبر التفاعل على أن يتم بالاتجاه العكسي. يمكن من حيث المبدأ إعادة شحن البطارية الرصاصية الحمضية عدداً لا نهائياً من المرات، ولكن ومع تكرار عمليات الشحن فإن قطعاً كبيرة من ملح كبريتات الرصاص الذي يتكون على الأقطاب يسقط في المحلول ويتجمع في أسفل الخلية ولا يمكن إزالته، هذا بالإضافة إلى فقدان جزء من المحلول بسبب التبخر وبسبب تشكل غازات خلال عملية التحلل الكهربائي.



الشكل (26.3): بنية خلية رصاصية - حمضية.

2.2.3 البطاريات الأساسية

البطاريات الأولية (الأساسية) هي بطاريات تستخدم حتى تفرَّغ ثم ترمى ولا يمكن إعادة شحنها، ومن الأنواع الشائعة من هذه البطاريات ــ بطاريات توتياء ــ كربون (Carbon-Zinc)، البطاريات القلويّة (alkaline)، بطاريات الزئبق، وبطاريات أوكسيد الفضة (silver oxide)، بطاريات التوتياء ــ هواء، وبطاريات التوتياء ــ فضة. يبيِّن الشكل (27.3) بعض أشكال البطاريات شائعة الاستخدام.



الشكل (27.3): أشكال البطاريات شائعة الاستخدام

تُعطى في الجدول (5.3) نماذج البطاريات الشائعة ومواصفاتها.

الجدول (5.3): البطاريات شائعة الاستخدام ومواصفاتها.

CELL TYPE	ANODE (-)	CATHODE (+)	MAXIMUM VOLTAGE (THEORETICAL) (V)	MAXIMUM CAPACITY (THEORETICAL) (Ah/KG)	WORKING VOLTAGE (PRACTICAL) (V)	ENERGY DENSITY (Wh/KG)	SHELF LIFE AT 25° C (80% CAPACITY MONTHS)
Carbon-zinc	Zn	MnO_2	1.6	230	1.2	65	18
Alkaline-MnO_2	Zn	MnO_2	1.5	230	1.15	65	30

CELL TYPE	ANODE (-)	CATHODE (+)	MAXIMUM VOLTAGE (THEORETICAL) (V)	MAXIMUM CAPACITY (THEORETICAL) (Ah/KG)	WORKING VOLTAGE (PRACTICAL) (V)	ENERGY DENSITY (Wh/KG)	SHELF LIFE AT 25° C (80% CAPACITY MONTHS)
Mercury	Zn	HgO	1.34	185	1.2	80	36
Silver oxide	Zn	AgO	1.85	285	1.5	130	30
Zinc-air	Zn	O_2	1.6	815	1.1	200	18
Lithium	Li	$(CF)_n$	3.6	2200	3.0	650	120
Lithium	Li	CrO_2	3.8	750	3.0	350	108
Magnesium	Mg	MnO_2	2.0	270	1.5	100	40

3.2.3 مقارنة البطاريات الأساسية (الاولية)

بطاريات توتياء-كربون

تعتبر بطاريات التوتياء-كربون من البطاريات متعددة الاستخدامات، وهي من النوع غير القابل لإعادة الشحن وتصنع من خلايا ذات جهد يساوي (1.6 V) إذا كان الخرج مفتوحاً وتستخدم في التطبيقات منخفضة إلى متوسطة استهلاك التيار. تعتبر علاقة تفريغ البطارية بالزمن غير خطيّة، حيث تنخفض كفاءة تيار الخرج عند الاستهلاك العالي للتيار، وهي ذات أداء غير جيد في درجات الحرارة المنخفضة ولكنها تمتاز بزمن تخزين لابأس به.

تستخدم هذه البطاريات لتغذية الألعاب، والأجهزة الإلكترونية المنزلية، وفي الكاميرات، وأجهزة الإضاءة المتقطعة وفي الساعات وأجهزة التحكم عند بعد اللاسلكية.

بطاريات كلوريد التوتياء

بطاريات كلوريد التوتياء هي نوع خاص للاستخدامات متوسطة إلى عالية التيار وهي من نوع بطاريات التوتياء-كربون. وتمتاز هذه البطاريات بأن لها منحني تفريغ كتابع للزمن أفضل من البطاريات السابقة (توتياء — كربون)، كما أن أداءها أفضل عند درجات حرارة أخفض بالمقارنة مع البطاريات السابقة.

تستخدم هذه البطاريات في أجهزة الراديو (Radios)، الأضواء المتقطعة، وفي إضاءة فوانيس الفلوريسانت، وفي الأدوات التي تقودها المحركات، بالإضافة إلى استخدامها في الأجهزة الصوتية المحمولة، وفي أجهزة الاتصال، والألعاب الإلكترونية والآلات الحاسبة البسيطة، وكذلك في مرسلات التحكم اللاسلكية.

البطاريات القلوية

البطاريات القلوية هي بطاريات متعددة الاستخدامات وهي ذات كفاءة عالية في ظروف الاستهلاك الدائم للتيار، وتستخدم في التطبيقات التي تستهلك تيارات عالية وبشكل دائم من البطارية. الجهد الاسمي للخلية الواحد يساوي (0.1 V) إذا كان خرجها مفتوحاً، وهذا الجهد أصغر من جهد خلية التوتياء — كربون، ولكن بمقارنة الخلايا القلوية مع خلايا التوتياء — كربون، فإنها تمتاز بحياة أطول أثناء التخزين، كما أنها ذات سعات وطاقة أكبر، وكذلك ذات أداء أفضل في

درجات الحرارة المنخفضة مع أن وزنها أقل بـ (50 %) من مثيلاتها التي نوعها توتياء ـ كربون. يمكن استبدال البطاريات القلوية ببطاريات التوتياء ـ كربون في التطبيقات وبالعكس. تستخدم البطاريات القلوية لتغذية كاميرات الفيديو، الألعاب التي تحوي محركات، فلاشات كاميرات التصوير، آلات الحلاقة الكهربائية، الأجهزة التي تقودها المحركات، الأجهزة الصوتية المحمولة، أجهزة الاتصال، كواشف الدخان، وفي الآلات الحاسبة. تتوفر البطاريات القلوية بأنواع قابلة للشحن وغير قابلة للشحن.

بطاريات الزئبق

بطاريات الزئبق صغيرة جداً، وهي غير قابلة للشحن ويبلغ جهد الخلية في هذا النوع من البطاريات (1.4) فولط، وبخلاف بطاريات التوتياء ـ كربون، والبطاريات القلوية فإن بطاريات الزئبق تحافظ على جهدها حتى قبل موتها النهائي. تتميّز هذه البطاريات بسعات أكبر، وبزمن تخزين أطول وبأداء أفضل في درجات الحرارة المنخفضة بالمقارنة مع بطاريات التوتياء ـ زئبق والبطاريات القلوية. تصمم بطاريات الزئبق في الأجهزة الصغيرة كأجهزة السمع المساعد (hearing aids) وفي الآلات الحاسبة والساعات والهواتف النقالة.

بطارية الليثيوم

هذه البطاريات غير قابلة للشحن ويستخدم فيها مصعد من الليثيوم، وواحد من عدة مهابط ومحلول عضوي (Organic electrolyte). يبلغ جهد خلية الليثيوم إما (1.5) أو (3.0) فولط، وتمتاز بكثافة استطاعة عالية وزمن تخزين يتراوح بين (8) إلى (10) سنوات ويمكن أن تعمل ضمن مجال واسع من درجات الحرارة، ولكن التيار الأعظمي الذي يمكن استجراره من البطاريات محدود. تستخدم بطاريات الليثيوم في الكاميرات، والمقاييس، وفي منظمات عمل القلب، وكذلك في تغذية عناصر التخزين الذاكرية CMOS وكذلك لتغذية وحدات الإظهار من نوع الكريستال السائل LCD في الساعات والآلات الحاسبة.

بطاريات أوكسيد الفضة

يبلغ جهد الخلية في بطاريات أوكسيد الفضة (1.85 V). وتستخدم في التجهيزات التي تستهلك تيارات نبضية عالية. لهذه البطاريات ميِّزة تفريغ مسطحة (flat) وذلك حتى موتها، ولكنها غالية الثمن وزمن تخزينها قصير. تستخدم هذه البطاريات في أجهزة الإنذار، وفي أجهزة الإنارة الاحتياطية وفي الأجهزة التشابهية وتتوفر هذه البطاريات بأنواع قابلة وغير قابلة للشحن.

بطاريات الهواء- توتياء

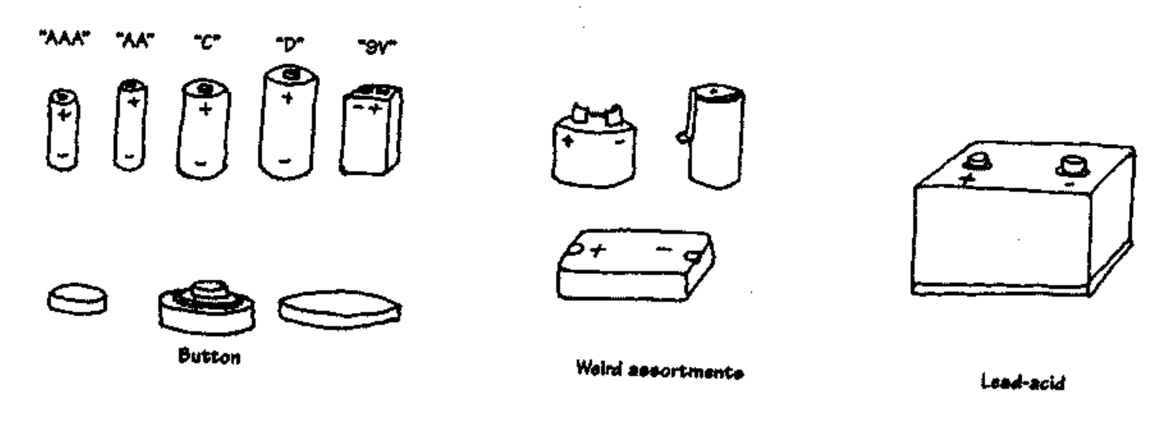
هذه البطاريات صغيرة وغير قابلة للشحن ويبلغ جهد الخلية فيها (1.15 V) إلى (1.4 V). في هذه البطاريات يُستخدم أوكسجين الهواء (O_2) كمكوِّن مهبطي يحوي فجوات هوائية. تدوم هذه البطاريات طويلاً وهي ذات أداء عالٍ مع زمن تخزين ممتاز ومجال درجات حرارة عملها معقول (من صفر إلى 50 °C). تستخدم هذه البطاريات في الأجهزة الصغيرة كأجهزة السمع المساعدة وفي أجهزة الاتصال اللاسلكي التي تستعمل في حالات الطوارئ.

4.2.3 البطاريات الثانوية

البطاريات الثانوية، وبعكس البطاريات الأولية، هي بطاريات قابلة للشحن، وتشبه مميزات التفريغ لهذه البطاريات مثيلاتها في البطاريات الأولية، ولكن وبلغة التصميم نقول إن البطاريات الثانوية تصنع للاستخدام طويل الأمد، وهي ذات مستويات طاقة عالية، أما البطاريات الأولية فتصمم أصلاً لأزمنة تفريغ قصيرة عند العمل بمستويات عالية الاستطاعة.

أغلفة أغلب البطاريات الثانوية تشبه أغلفة البطاريات الأولية، ماعدا البطاريات الحمضية الرصاصية والبطاريات متعددة الاستخدامات. تستخدم البطاريات الثانوية لتغذية أجهزة الحاسوب المحمولة (Laptop Computers)، العربات الكهربائية (electric vehicles)، أجهزة التغذية المحمولة، نظم الإنارة الاحتياطية، ونظم إقلاع المحركات.

يبيّن الشكل (28.3) بعض الأشكال الشائعة للبطاريات الثانوية.



الشكل (28.3): بعض الأشكال الشائعة للبطاريات الثانوية.

وتُعطى في الجدول (6.3) الأنواع الشائعة للبطاريات الثانوية ومواصفاتها.

الجدول (6.3): الانواع الشائعة من البطاريات الثانوية ومواصفاتها.

BATTERY TYPE	ANODE (-)	CATHODE (+)	MAXIMUM VOLTAGE (THEORETICAL) (V)	MAXIMUM CAPACITY (THEORETICAL) (Ah/KG)	WORKING VOLTAGE (PRACTICAL) (V)	ENERGY DENSITY (Wh/KG)
Lead-acid	Pb	PbO_2	2.1	55	2.0	37
Edison (Ni-Fe)	Fe	NiO_x	1.5	195	1.2	29
NiCad	Cd	NiO_x	1.35	165	1.2	33
Silver-cadmium	Cd	AgO	1.4	230	1.05	55
Cadmium-air	Cd	Air(O_2)	1.2	475	0.8	90
Silver-zinc	Zn	AgO	1.85	285	1.5	100
Zinc-air	Zn	Air(O_2)	1.6	815	1.1	150

البطاريات الحمضية الرصاصية، وبطاريات النيكل-كادميوم

البطاريات الحمضية الرصاصية

البطاريات الحمضية الرصاصيّة هي بطاريات قابلة للشحن ويبلغ جهد الخلية فيها (2.15 V) إذا كان خرجها مفتوحاً وتحافظ الخلية على جهد يتراوح بين (1.75 V) و(1.9 V) عند وصلها مع الحمل، أما عدد مرات إعادة الشحن فيساوي (1000) مرة، وتتوفر هذه البطاريات بأنواع سريعة الشحن، أو معيارية، أو ذات شحن بطيء. يمكن أن تخدم البطارية

الحمضية الرصاصية مدة تصل إلى (18) شهراً قبل أن ينخفض جهدها إلى (% 80) من قيمته العظمى، ويسمى هذا الزمن باسم زمن الاحتفاظ بالشحنة (charge retention time). تحوي هذه البطاريات على محلول كيميائي سائل يحتاج إلى تبديل. تكفي (6) ست خلايا من هذا النوع لتكوين بطارية سيارة.

بطاريات النيكل- كادميوم

تحوي بطاريات النيكل ــ كادميوم على خلايا قابلة للشحن ويبلغ جهد الخلية الواحدة حوالي (1.2 V) وهذه الخلايا قابلة للاستبدال بخلايا كربون ــ توتياء أو خلايا قلوية. في الثلثين الأوليين من حياة البطارية يكون منحني التفريغ مسطحاً تقريباً، أما في الثلث الأخير فينخفض بوضوح. يبلغ وزن بطاريات النيكل ــ كادميوم ثلث وزن مثيلاتها من بطاريات التوتياء ــ كربون ولا ينصح بوصل هذه البطاريات على التوازي أما الوصل التسلسلي فلا مشاكل فيه. تستخدم هذه البطاريات في الألعاب، والأجهزة الإلكترونية المنزلية، وفي الكاميرات، والأضواء المتقطعة، والكاميرات، وأجهزة التصوير وفي أدوات وأجهزة القدرة وغيرها من التطبيقات.

شحن البطاريات الثانوية

تُشحن البطارية بوصل مصدر جهد أكبر من جهدها الاسمي بين طرفيها، والجهد الاسمي للبطارية هو الجهد بين طرفي البطارية دون أن يكون هناك حمل موصول معها (الجهد على فراغ). يمر تيار من مصدر جهد الشحن إلى البطارية بمعدَّل يتعلق بالفرق بين جهد مصدر الشحن وجهد البطارية على فراغ. يتحدد معدَّل الشحن (أو معدَّل التفريغ) بتقسيم سعة البطارية (battery's capacity) على زمن الشحن/أو التفريغ. وبشكل عام يؤدي تخفيض معدَّل التفريغ إلى زيادة مردود أو كفاءة عملية الشحن. عند شحن بطارية من الضروري جداً الانتباه كي لا يحدث شحن زائد (overcharge) لأن الشحن الزائد قد يؤدي إلى حدوث تفاعلات جانبيّة (غير التفاعلات التي تحوِّل القدرة الكيميائية إلى كهربائية)، وهذه التفاعلات تحدث في المحلول الكهربائي وتؤدي إلى تحول بعض مكونات المحلول إلى غاز يخرج من البطارية. يؤدي الشحن الزائد للبطارية من حيث النتيجة النهائية إلى تخفيض مردود وكفاءة البطارية.

5.2.3 سعة البطارية

تعرَّف سعة البطارية بمقدار القدرة الكهربائية التي يمكن للبطارية أن تعطيها خلال فترة من الزمن. تساوي سعة البطارية التيار المسحوب مضروباً بالزمن حتى تموت البطارية، أما واحدات سعة البطارية فهي الأمبير ــ ساعة (Ah) والميللي أمبير ــ ساعة (mAh).

مثال:

بفرض أن لديك بطارية 1.5 V من القياس D سعتها (1000 mAh)، كم يكون عمر هذه البطارية إذا استخدمت لتزويد حمل قدرة (1000 Ω) بالطاقة؟

الحل:

يتم أولاً حساب التيار المستهلك من البطارية من العلاقة:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1.5V}{1000\Omega} = 1.5mA$$

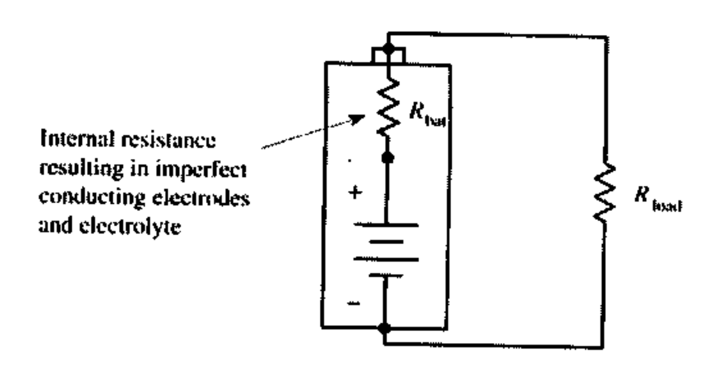
ومن أجل حساب زمن التفريغ يتم تقسيم سعة البطارية على التيار:

$$\frac{\textit{Capacity rating}}{\textit{initially drawn current}} = \frac{1000mAh}{1.5mA} = 666h$$

إذا تم تخفيض المقاومة إلى (Ω 10)، فإن زمن التفريغ ينخفض إلى (6.6) ساعة. من الملاحظ في البطاريات أن سعة البطارية تنخفض مع زيادة استهلاك التيار، لذلك فإن الحسابات في المثال السابق ليست دقيقة تماماً، وذلك لأن الحرارة الزائدة التي تتولد داخل البطارية، وضياعات المردود الناتجة عن الحرارة الزائدة يحدان من إمكانية الحصول على تيارٍ عالٍ لفترة طويلةٍ من الزمن.

6.2.3 ملاحظة عن هبوط الجهد الداخلي على البطاريّة

للبطاريات مقاومة داخلية تنتج عن النقل الكهربائي غير التام لبعض مكونات البطارية (مثل مقاومة أقطاب البطارية والمحلول).عندما تكون البطارية جديدة تكون مقاومتها الداخلية منخفضة (ويكون هبوط الجهد الداخلي على البطارية بضعة أعشار الفولت)، ولكن ومع تقدم عمر البطاريّة تزداد مقاومتها الداخلية بسبب نقص عدد الإلكترونات الناقلة مع قرب انتهاء التفاعل الكيميائي. تبيِّن الدارة التالية تصوراً أكثر واقعية للبطارية التي يُوصل إليها حمل خارجي.



الشكل (29.3)

من هذا الشكل نلاحظ أنه في حالة وصل حمل خارجي إلى البطاريّة، فإن الدارة تبدو كما لو أن البطارية موصولة إلى مقاومتين موصولتين على التسلسل (المقاومة الداخلية ومقاومة الحمل الخارجي) وتؤدي المقاومة الداخلية إلى نشوء هبوط جُهد داخلي ويكون الجهد الفعلي المطبق على الحمل أصغر من جهد البطارية الاسمي.

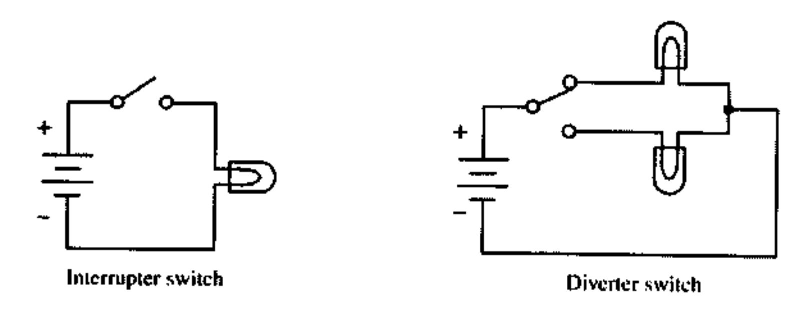
وفي الحياة العملية لا يكون ضرورياً معرفة قيمة المقاومة الداخلية للبطارية، وبدلاً من ذلك يُوصل حمل إلى البطاريّة ويُقاس الجهد بين طرفي البطاريّة.

والجهد المقروء بواسطة مقياس الفولت يبيِّن الجهد الفعلي الذي يطبق على الحمل. طبعاً لا يمكن قياس المقاومة الداخلية للبطارية بواسطة مقياس الأوم). من الجدير بالملاحظة هنا هو أن المقاومة الداخلية للبطارية تحد من قدرة البطارية على إعطاء التيار العالي المطلوب في التطبيقات النبضيّة، كما في فلاشات الكاميرات وأجهزة الراديو (الاتصال) التي تستخدم لإرسال إشارات نبضية.

تعتبر بطاريات أوكسيد الفضة من البطاريات المناسبة للتطبيقات التي تتطلب تيارات نبضية عالية.

3.3 المفاتيح

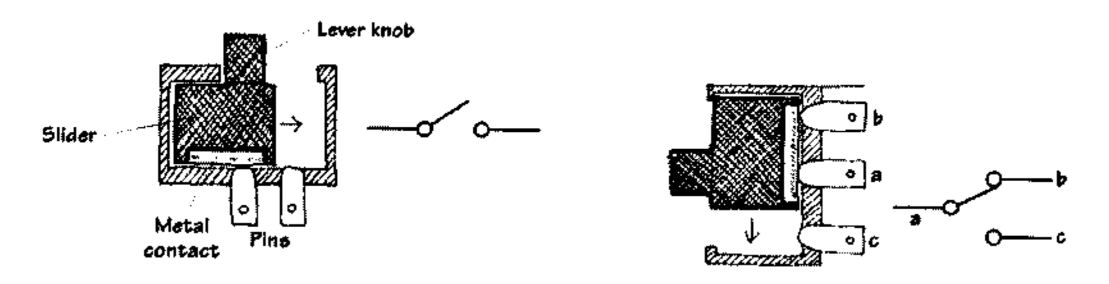
المفتاح (Switch) هو أداة ميكانيكية تستخدم إما لقطع التيار أو لتحويل مساره في الدارة الكهربائية.



الشكل (30.3): مفتاح لوصل وفصلها الدارة ومفتاح لتحويل مسار التيار في الدارة.

1.3.3 كيف يعمل المفتاح

يبيِّن الشكل (31.3) مفتاحاً من النوع ذي الزالقة، فالمفتاح المبيَّن في الشكل (31.3) اليساري يُستخدم لوصل دارة معينة وفصلها، أما المفتاح المعطى في الشكل (31.3) اليميني فيمكن استخدامه لتحويل مسار التيار من فرع إلى آخر في الدارة (أي على الوضع العلوي المرسوم يكون التماسان (a) و(b) موصولين، أما على الوضع السفلي فيوصل التماسان (a) و(c). توجد أنواع أخرى من المفاتيح كمفاتيح الكبس (الضغط push-button switches) ومفاتيح (rocker switches) ومفاتيح القصبة المغناطيسيّة، وهذه المفاتيح تعمل بطريقة مخالفة لطريقة عمل المفاتيح ذات الزالقة. فمثلاً في مفتاح القصبة المغناطيسيّة يتم استخدام تماسين معدنيين رقيقين يُجذبان إلى حالة وصل بواسطة مغناطيس خارجي. سوف يُناقش هذا المفتاح مع غيره من المفاتيح في الفقرات التالية.



الشكل (31.3): مفاتيح ذات زالقة.

عندما تدفع مسكة الزالقة في الشكل (31.3) اليساري إلى اليمين فإن الشريحة الميكروية توصل التماسات مع بعضها ويمر التيار بين التماسين في الدارة وتكون الدارة في حالة (on)، وعند إعادة دفع مسكة الزالقة إلى اليسار يُفصل التماسان عن بعضهما وتصبح الدارة التي فيها المفتاح في حالة (off). في الشكل (31.3) اليميني وعندما تكون مسكة الزالقة في الأعلى يكون هناك وصل بين التماسات (a) و(b) وعند دفعها إلى الأسفل يتحقق وصل بين التماسات (a) و(c).

2.3.3 وصف مفتاح

يتميَّز المفتاح بعدد أقطابه (poles) وبعدد وضعياته (throws)، ويمثل القطب تماساً كالنقطة (a) في الشكل (31.3) اليميني، أما الوضعيَّة (throw) فإنها تمثل وصلاً من تماس إلى آخر، كالوصل بين التماس (a) و(b) في الشكل (31.3) اليميني أو كالوصل بين التماس (a) و(c) في نفس الشكل ويُوصف المفتاح بعدد أقطابه (P) وبعدد حالاته (T)، وعند وصف المفتاح بعدد أقطابه وعدد وضعياته يتم عادة استخدام التقليد التالي:

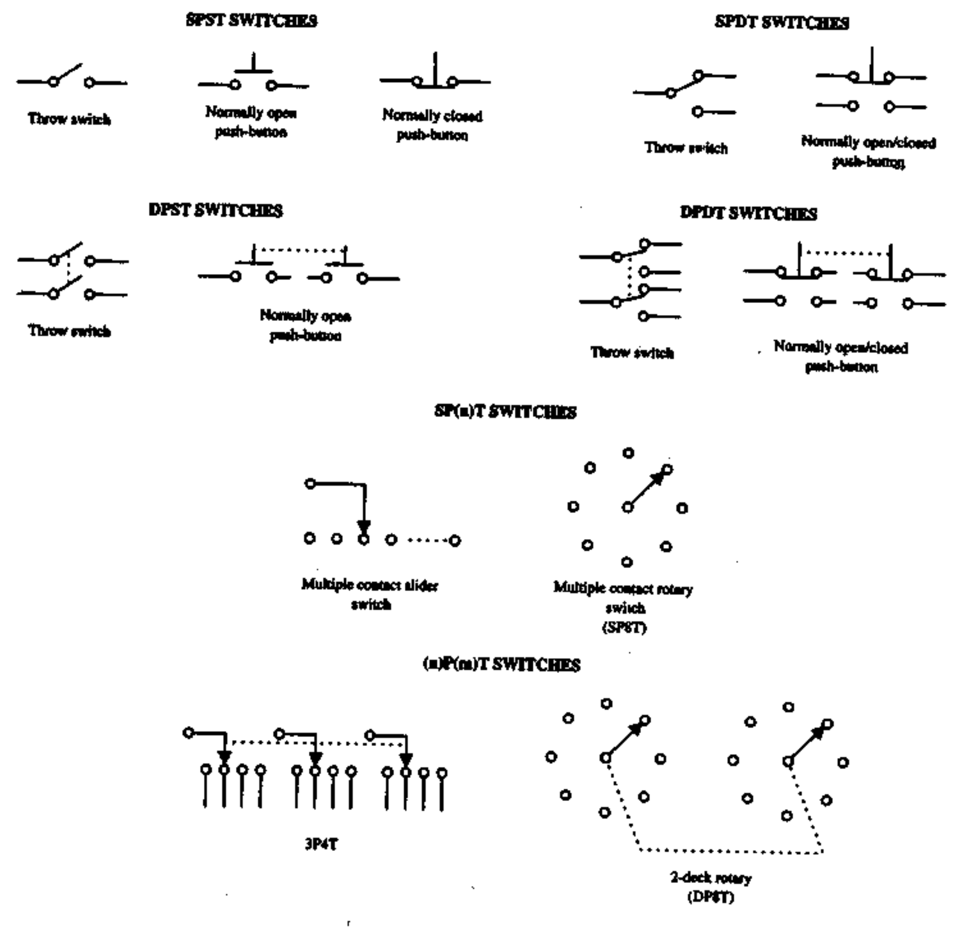
عندما يكون عدد الأقطاب (P) أو عدد الوضعيات (1) واحد يتم استخدام الحرف S أي (مفرد Single)، أما عندما يكون عدد الأقطاب أو عدد الوضعيات اثنان (2) يُستخدم الحرف D أي (مضاعفاً double) ولكن إذا زاد عدد الأقطاب أو عدد الوضعيات عن (2) فإن الأرقام (3) أو (4) أو (5) هي التي تستخدم للدلالة على عدد الأقطاب أو الأصفار.

وفيما يلي بعض الأمثلة على ذلك:

SPST ،SPDT ،DPST ،DPDT ،DP3T ،3P6T

يمثل المفتاح المبيَّن في الشكل (31.3) اليساري مفتاحاً SPST، أي وحيد القطب وحيد الوضع، أما مفتاح الشكل (32.3) اليميني فيمثل مفتاح وحيد القطب ثنائي الوضع (SPDT).

يجب أن نلاحظ أثناء الاستخدام فيما إذا كان المفتاح له وضعية وصل مؤقتة (momentary contact action)، أو إذا كان المفتاح له وضعية off (قطع مركزية). مفاتيح الوصل المؤقت هي مفاتيح الضغط (pushbutton) والتي تستخدم لوصل أو قطع دارة بشكلٍ مؤقت، وتتوفر هذه المفاتيح بأنواع NC والذي يعني أن المفتاح مغلق في الوضع الطبيعي (Normally Closed) أو NO أو مفتوح في الوضع الطبيعي (Normally Opened). ومفاتيح NC توصل الدارة في الوضع الطبيعي، ويمر التيار عبر الدارة عند عدم ضغط المفتاح، أما مفاتيح no فإنها تفصل (تقطع الدارة) ولا يمر تيار إذا لم يتم ضغط المفتاح. المفاتيح ذات الوضع المركزي (off) هي مفاتيح تستخدم في مفرعات الدارة (dividers) وتحوي على تماس في حالة (off) بين تماسين في حالة (on). لا تحوي كل المفاتيح على وضع مركزي (off) ويُشار إلى هذه الميزة عند توفرها في المفتاح.



الشكل (32.3): رموز المفاتيح.

3.3.3 أنواع المفاتيح

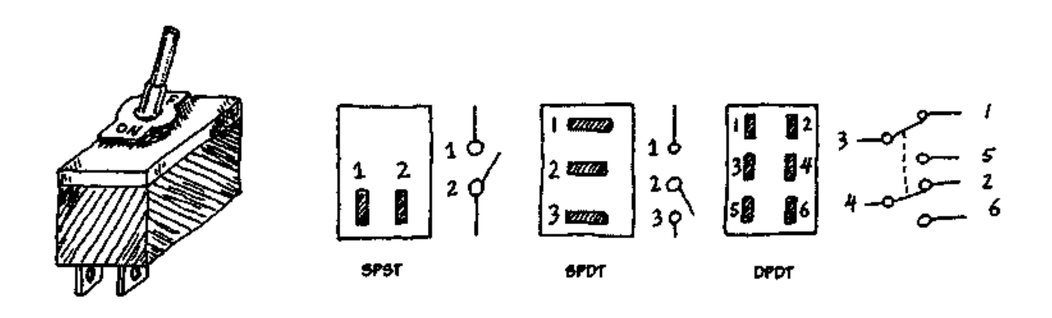
يبيِّن الشكل (33.3) أنواعاً مختلفة من المفاتيح ومنها المفتاح المفصلي (Toggle Switch) ويمكن أن يكون من نوع (SPST)، (SPDT)، (DPDT). مفتاح الضغط (pushbutton switch)، ويمكن أيضاً أن يكون من نوع (SPST)، (DPST) و(SPDT).

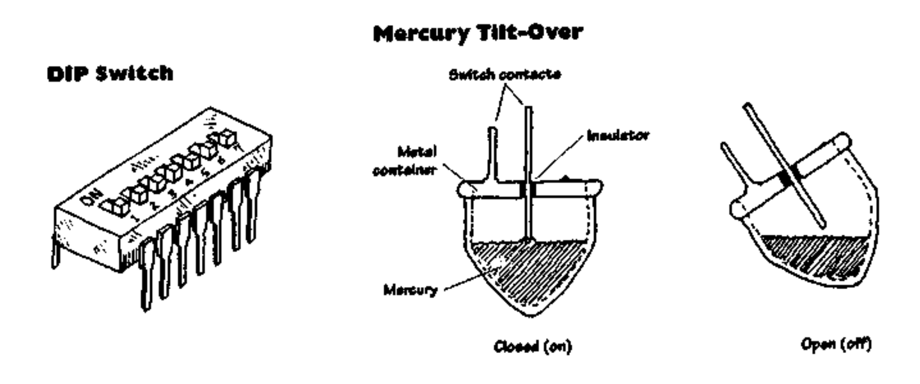
مفتاح ذو طبقة (snap switch)، والمفتاح الدوار (Rotary Switch) ومفتاح القصبة المغناطيسيّة (Magnetic Reed Switch)، ويتكون هذا المفتاح من تماسين متقاربين متوضعين في حاوية مفرَّغة من الهواء وعند تقريب مغناطيس من المفتاح يتلاقى التماسان ويغلقان الدارة (إذا كان المفتاح من نوع (NO) أو يتباعدان ويفصلان الدارة إذا كان المفتاح من نوع (NC).

المفاتيح المرمزة ثنائياً (Binary-coded switches)، وتستخدم هذه المفاتيح لترميز المعلومات الثنائية وتوجد ضمن المفتاح آلية ميكانيكيّة توصل الوصلات أو تفصل وفقاً لوضع القرص المدرج على واجهة المفتاح، وتتوفر هذه المفاتيح بأشكال للترميز الثنائي أو السداسي-عشري أو متمم الثنائي أو متمم السداسي-عشري (Complementary binary/hexadecimal) ويبيّن الجدول المعطى في الشكل إلى جوار أشكال هذه المفاتيح كيفية عمل هذه المفاتيح.

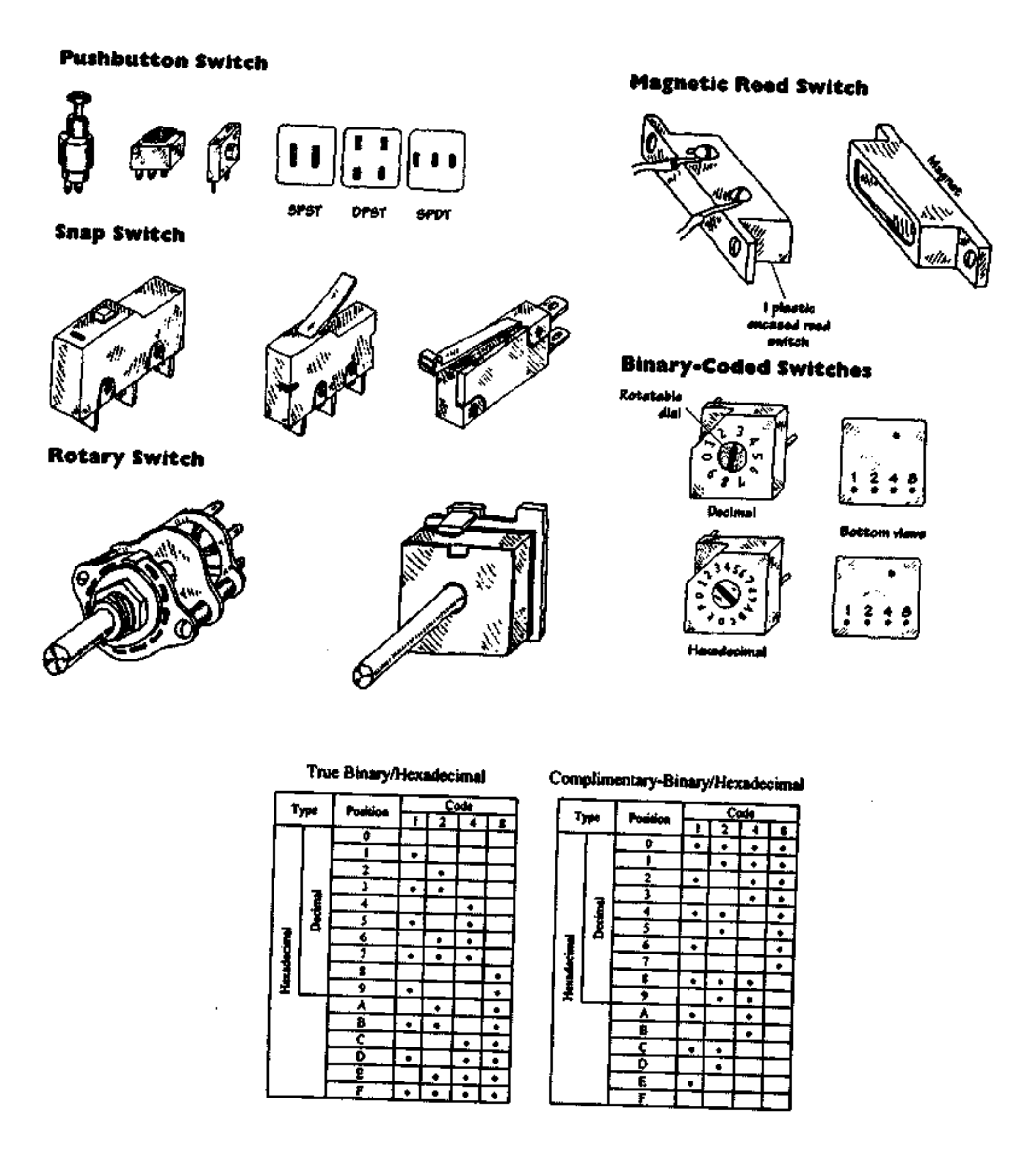
مفاتيح DIP وDIP هي اختصار لـ (dual-inline package)، وهي عبارة عن مجموعة مفاتيح في غلاف واحد له صفان متناظران من الأرجل مع وجود زالقة لوصل التماس أو فصله بين كل طرفيتين متناظرتين. يمكن أن توضع هذه المفاتيح على قاعدة دارة تكاملية.

مفتاح الإمالة الزئبقي (Mercury Tilt-Over)، وهو مفتاح يستخدم للتحسس بالمستوى (Level-sensing)، وعادة يكون المفتاح في حالة (on) عندما يكون المفتاح عمودياً (oriented vertically) حيث يتحقق الوصل بين التماسين بواسطة الزئبق، أما عند إمالة المفتاح فإن الوصل بين التماسين يزول بسبب انخفاض مستوى الزئبق ويُقطع المفتاح (off).





الشكل (33.3): أنواع مختلفة من المفاتيح.



True Binary/Hexadecimal

Type		Position	Code 1	Code 2	Code 4	Code 8
Hexadecimal	Decimal	0				
		1	•			
		2		•		
		3	•	•		
		4			•	
		5	•		•	
		6		•	•	
		7	•	•	•	
		8				•
		9	•			•
		A		•		•
		B	•	•		•
		C			•	•
		D	•		•	•
		E		•	•	•
		F	•	•	•	•

Complimentary-Binary/Hexadecimal

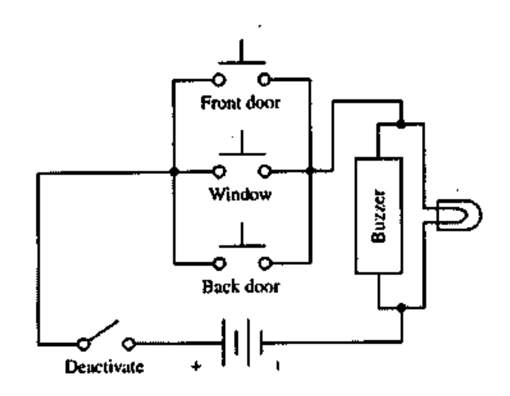
Type		Position	Code 1	Code 2	Code 4	Code 8
Hexadecimal	Decimal	0	•	•	•	•
		1		•	•	•
		2	•		•	•
		3			•	•
		4	•	•		•
		5		•		•
		6	•			•
		7				•
		8	•	•	•	
		9		•	•	
		A	•		•	
		B			•	
		C	•	•		
		D		•		
		E	•			
		F				

تابع الشكل (33.3): انواع مختلفة من المفاتيح.

4.3.3 تطبيقات بسيطة للمفاتيح

دارة إنذار امان بسيطة

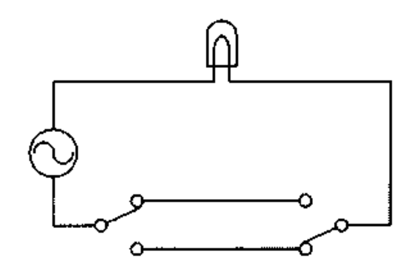
تُعطى في الشكل (34.3) دارة إنذار أمان بسيطة لبيت، حيث ينطلق إنذار ضوئي وصوتي عند إغلاق أحد المفاتيح الثلاث الموجودة في الوضع الطبيعي في حالة قطع (off). تصلح مفاتيح القصبة المغناطيسية للاستخدام بشكلٍ ممتاز في مثل هذه التطبيقات.



الشكل (34.3): دارة إنذار بسيطة.

دارة قطع/وصل (on/off) ثنائية الموضع

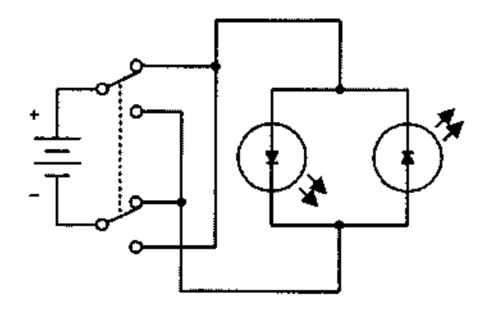
تبيِّن هذه الدارة كيفية استخدام مفتاحين بسيطين (SPDT) لوصل وفصل إضاءة مصباح من موضعين مختلفين، وتستخدم بكثرة في التمديدات الكهربائية المنزلية.



الشكل (35.3): دارة بسيطة ثنائية الوضع.

دارة لعكس اتجاه التيار

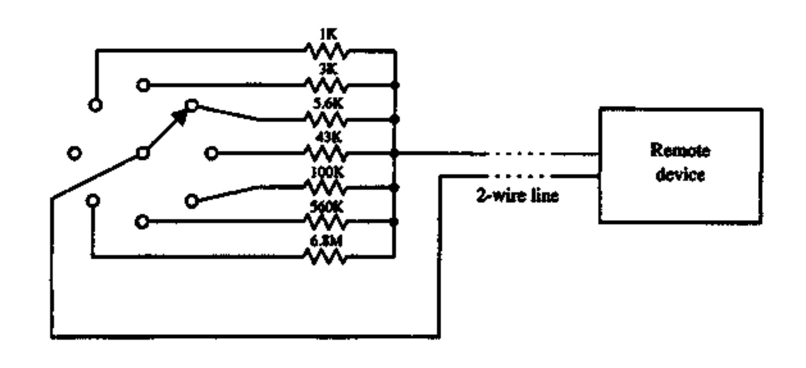
يستخدم في هذه الدارة (الشكل 36.3) مفتاح DPDT من أجل عكس اتجاه مرور التيار في الدارة، فعندما يكون وضع المفتاح كما في الشكل (في الأعلى) يمر التيار من موجب البطارية عبر التماسات العلوية إلى الديود اليساري فسالب التغذية ويضيء الـ LED اليساري، وعندما ينقل المفتاح إلى الوضعية السفلى يمر التيار من موجب التغذية إلى التماس السفلي الموجود في الطرف العلوي إلى الديود LED اليميني (الذي يمرر في اتجاه واحد) ويضيء هذا الـ LED إلى الأعلى فاليسار فالأسفل إلى التماس السفلي فسالب التغذية.



الشكل (36.3): دارة بسيطة ومفتاح لعكس اتجاه مرور التيار.

تحكم متعدد الخيارات لعنصر متحسس بالجهد عن طريق خط ثنائي السلك

بفرض أنك تريد قيادة جهاز تحكم عن بُعد باستخدام خط ثنائي السلك وبفرض أن الجهاز له سبع وضعيات عمل مختلفة. إحدى طرق قيادة هذا الجهاز تتلخص بتصميم الجهاز بحيث تتغير وضعية الجهاز أو حالة عمله بتغيير مقاومة خارجية موصولة مع الجهاز عبر خط ثنائي السلك، حيث يمكن أن تكون هذه المقاومة جزءاً من مقسم جهد وخرج هذا المقسّم موصول إلى مبدل تشابهي رقمي (A/D) أو إلى مداخل مجموعة مقارنات. ويتم تحديد قيم المقاومات التي تجعل جهاز التحكم يقوم بالأعمال المطلوبة. توصل المقاومات كما في الشكل إلى مفتاح دوار متعدد الوضعيات وتصبح عملية قيادة جهاز التحكم بسيطة وتتم بتدوير المفتاح لاختيار المقاومة المطلوبة.



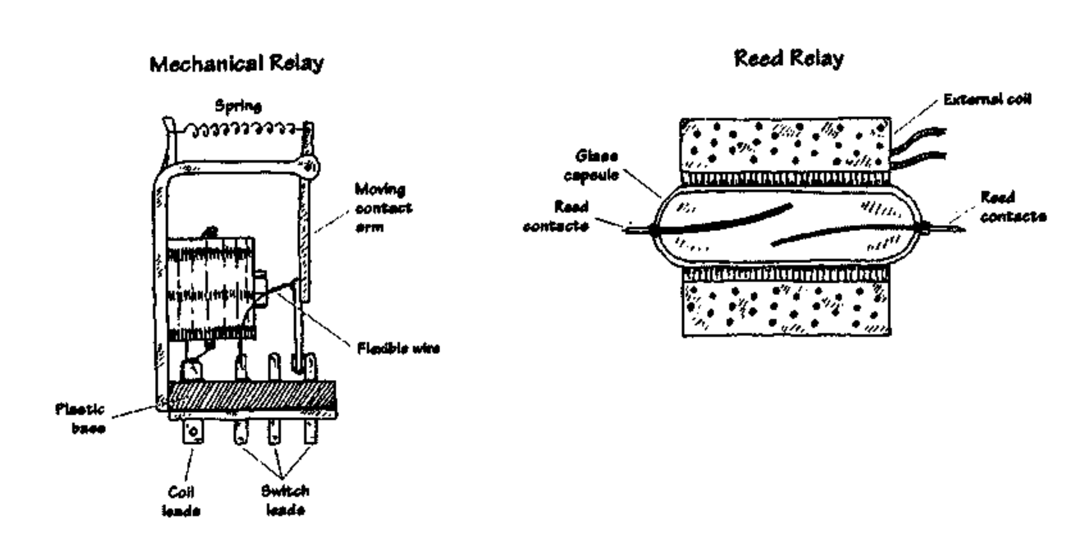
الشكل (37.3): استخدام المفتاح الدوار لقيادة جهاز تحكم عن بعد سلكي.

4.3 الحواكم

الحواكم هي مفاتيح يتم تفعيلها كهربائياً وتوجد ثلاثة أنواع من الحواكم هي:

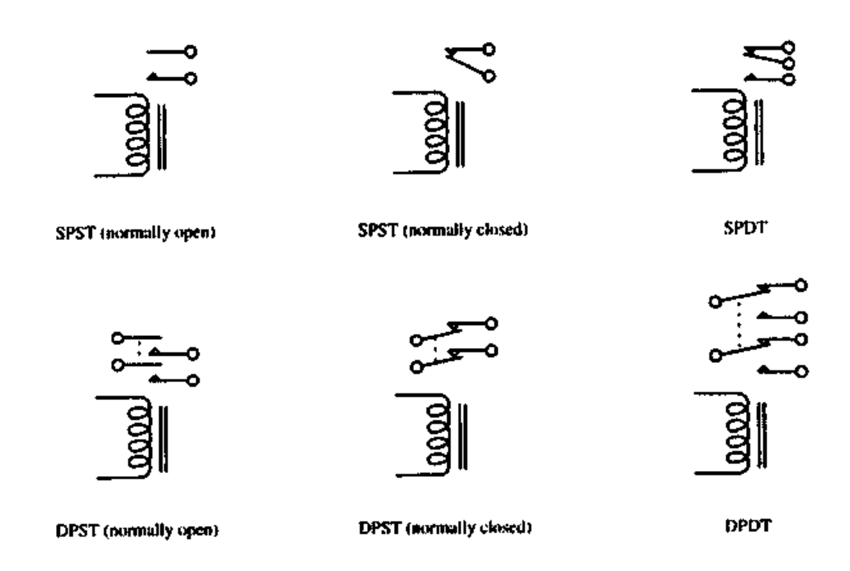
الحواكم الميكانيكيّة (Mechanical Relays)، والحواكم القصبية (reed relays) والحواكم المصنوعة من أنصاف نواقل solid-state relays. في الحواكم الميكانيكية وعند مرور تيار في ملف الحاكمة يتشكل مغناطيس كهربائي يجذب تماسات الحاكمة فتغيّر وضعها من حالة إلى أخرى والتماس المتحرك مزوّد بنابض إرجاع يعيد التماسات إلى حالتها الطبيعيّة عند انقطاع التيار المار عبر ملف الحاكمة. تتكون الحواكم القصبيّة من زوج من القصبات (وهي عبارة عن شرائح معدنية مرنة) تتلامس مع بعضها عند مرور تيار في ملف محيط بها. تعتبر الحواكم المصنوعة من أنصاف نواقل والتي تسمى حواكم الحالة الصلبة (solid-state relays) عناصر تنتقل من حالة إلى حالة بالنسبة لوصل التيار أو فصله عن طريق تطبيق جهد خارجي على متصلات نصف ناقلة نوع n و p (انظر الفصل الرابع). تصمم الحواكم الميكانيكيّة في الحالة العامة من أجل التيارات العالية (من 2 حتى ما يزيد عن 40 أمبير) وأزمنة الوصل والفصل الطويلة نسبياً (بطيئة الاستجابة) من (10) إلى (100) ميللي ثانية.

تستخدم الحواكم القصبيّة في التطبيقات متوسطة التيارات (من 500 mA إلى 1 A).تتوفر حواكم الحالة الصلبة (حواكم أنصاف الناقل) لمجال واسع من التيارات التي تتراوح من بضعة ميكرو أمبير وحتى 100 A وتمتاز بسرعة الانتقال من حالة إلى حالة (من 1 إلى 100 nS). هناك حدود لاستخدامات الحواكم الميكانيكية والقصبيّة وهي تضرر تماسات هذه الحواكم بسبب الشرارات المنبعثة أثناء الإغلاق وكذلك محدودية أشكال الدارات التي تستخدم فيها هذه الحواكم.



الشكل (38.3): أشكال الحواكم الميكانيكية والقصبيّة.

يتوفر قسم الفتح والإغلاق في الحواكم الميكانيكيّة بأنواع تشبه المفاتيح اليدوية المعياريّة مثل SPST، SPDT، DPDT، أما الحواكم القصبيّة وحواكم الحالة الصلبة فهي دوماً من نوع SPST وفيما يلي رموز لمختلف أنواع الحواكم الميكانيكيّة.

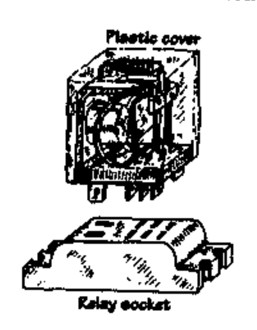


الشكل (39.3): رموز لمختلف أنواع الحواكم الميكانيكيّة.

يمكن أن يكون الجهد اللازم لتفعيل الحاكمة جهداً مستمراً (dc) أو متناوباً (ac)، فمثلاً عند مرور تيار متناوب في ملف حاكمة (ac) فإن الصفيحة المعدنية المتحركة (مرنة flexible) والناقلة تُجذَب باتجاه أحد التماسات وتبقى على هذا الوضع طيلة فترة مرور التيار عبر ملف الحاكمة، أما إذا تم تطبيق جهد متناوب على ملف حاكمة (dc) فإن الصفيحة المتحركة ستجذب إلى الأمام مثلاً ثم تعود إلى الخلف بتردد الجهد المطبق. تتوفر حواكم ميكانيكية بميزة المسك (latching feature) وهذا ما يجعلها كنوع من الذواكر. عند تطبيق نبضة تفعيل على حاكمة ماسكة، فإن تماساتها تُغلق حتى عند فصل نبضة التحكم وتبقى في حالة إغلاق، ومن أجل فتح التماسات تطبق على الحاكمة نبضة مستقلة.

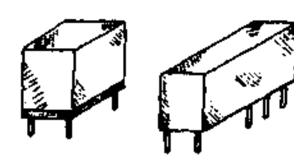
1.4.3 أنواع محددة من الحواكم

الحواكم الصغيرة



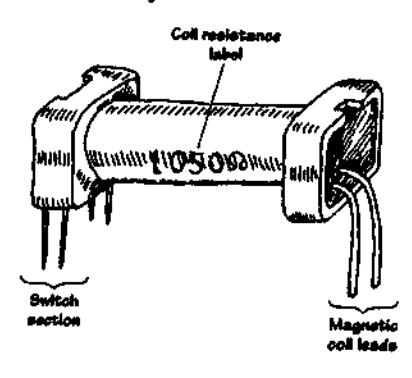
تصمم الحواكم الميكانيكيّة لوصل وفصل التيارات العالية نسبياً، وتتوفر بملفات تفعيل بجهد مستمر (dc) أو بجهد متناوب (ac). القيم النموذجية لجهود التفعيل المستمرة (dc) هي (6)، (12)، و(24) فولط مستمر أما مقاومات ملفات الحواكم فهي على الترتيب (40)، (160) و(650) أوم — تفعل ملفات الحواكم المتناوبة من جهود 110 و220 — حتى 240 فولط، أما مقاومات ملفات الحواكم فهي على الترتيب (3400) وحتى (13600) أوم. تتراوح سرعات الفتح والإغلاق في هذه الحواكم بين (10 mS) و(100 mS) أما تيارات التماسات فتتراوح بين 2 A و40 A.

الحواكم المصغرة



تشبه الحواكم المصغَّرة النوع السابق من الحواكم ولكنها تصمم من أجل حساسية أعلى ومستويات تيار أقل من سابقاتها وتفعل هذه الحواكم بجهد مستمر حصراً ولكنها يمكن أن تستخدم للوصل والفصل في دارات التيار المتناوب. جهود تفعيل هذه الحواكم هي 5، 6، 12 و24 V مستمر (dc)، أما مقاومات ملفاتها فتتراوح بين (50) و(3000 Ω).

الحواكم القصبية



تستخدم في هذه الحواكم شريحتين ناقلتين ناعمتين، أو قصبتين، تعملان كتماسات متحركة، توضع القصبات في أنبوب زجاجي محكم ويُحاط الأنبوب بملف خارجي. عند مرور تيار في الملف الخارجي تتلامس القصبات الداخلية وتغلق المفتاح وتمتاز هذه الحواكم بسرعة الوصل بسبب خفة وزن التماسات. تتراوح سرعة الوصل في هذه الحواكم بين (0.2 mS) و(2 mS). تماسات هذه الحواكم إما أن تكون جافة أو مبللة بالزئبق. تُفعل هذه الحواكم بجهد مستمر (5) أو (6) أو (12) أو (24) فولط مستمر. تتراوح مقاومات ملفات هذه الحواكم بين (250) و(2000 Ω).

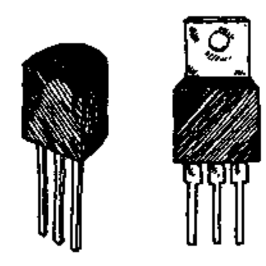
تُصنع أطراف هذه الحواكم بحيث تُثبت الحاكمة على دارة مطبوعة.

الشكل (40.3): أنواع خاصة من الحواكم.

حواكم الحالة الصلبة

تصنع هذه الحواكم من مواد نصف ناقلة وتضم هذه الحواكم ترانزستورات (FETs) أو (BJTs) وثايرستورات (SCRs)، أوترياكات ودياكات وغيرها. لا توجد مشكلة تآكل تماسات في هذا النوع من الحواكم وتمتاز بسرعة الفتح والإغلاق. لهذه العناصر ممانعة وهي في حالة (on) أكبر من ممانعة تماسات الحواكم الميكانيكية عندما تكون في حالة وَصل وهي أقل من الحواكم الميانيكية مقاومة للتحميل الزائد. ستدرس هذه الحَواكم لاحقاً في هذا الكتاب.

Solid-State Relays




تابع الشكل (40.3): أنواع خاصة من الحواكم.

2.4.3 بضع ملاحظات عن الحواكم

يجب أن يكون الجهد المطبق على ملف الحاكمة مساوياً جهد التفعيل الاسمي ± 25%، وإذا تم تطبيق جهد على الملف أعلى بكثير من جهد التفعيل الاسمي، فإن ذلك قد يدمر الملف، أما تطبيق جهد أصغر من الجهد المطلوب فإن هذا الجهد قد لا يكون كافياً لتفعيل الحاكمة أو يؤدي إلى وصل وفصل متكرر بين التماسات، حيث تجذب الصفيحة المتحركة بشكل خاطئ إلى الأمام وتعود إلى الخلف.

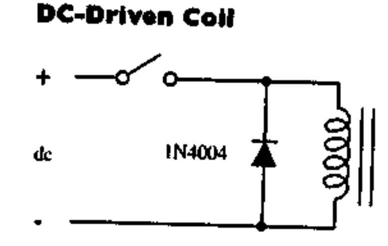
يعمل ملف الحاكمة كتحريضية ومن المعروف أن الملفات تحد من التغيرات المفاجئة للتيار وإذا تم قطع التيار المار عبر الملف (لنقل أن مفتاح وصل التيار إلى ملف الحاكمة قد تم فصله) فإن الملف وكاستجابة على انقطاع التيار سوف ينتج جهد مفاجئ كبير بين طرفيه مما يؤدي إلى مرور تيار مفاجئ عالٍ جداً عبر الملف.

تنتج هذه الظاهرة فيزيائياً عن تداعي الحقل المغناطيسي ضمن الملف عند انقطاع التيار فجأة، ورياضياً يمكن فهم ذلك من ملاحظة التغيُّر الكبير في التيار الذي يؤثر على الجهد على طرفي الملف [$V = L\,(di/dt)$]. القفزات المفاجئة التي تنتج عن السلوك التحريضي يمكن أن تخلق ومضات جهدية خطرة (قد تصل إلى 1000 V) وهذه القفزات الجهدية يمكن أن يكون لها آثار مؤذية على العناصر الموجودة في الدارة فمثلاً يمكن أن ينهار المفتاح أو ينهار الترانزستور الموجود في الدارة، كما يمكن أن تنهار مفاتيح بسيطة تعمل باللمس. هذه القفزات الجهدية لا تؤذي العناصر المجاورة فقط ولكنها تؤذي الحاكمة بحد ذاتها حيث تتضرر التماسات لأن التماسات تتلقى ضربة قاسية من الصفيحة الناقلة المتحركة وذلك عند حدوث الومضة الجهدية في الملف.

يمكن التخلص من هذه الومضات الجهدية باستخدام كوابت الحالات العابرة (transient suppressors)، ويمكن شراء هذه الكوابت جاهزة ضمن أغلفة خاصة بها أو يمكنك بناؤها بنفسك. سنتعرف فيما يلي على بعض كوابت الحالات العابرة التي تُصنع ذاتياً ويمكن استخدامها في دارات الحواكم وفي دارات أُخرى تحوي ملفات (كملفات المحولات). لاحظ أن المفتاح الموجود في الدارة هو واحد من أنواع عديدة من الأدوات التي يمكن استخدامها لقطع التيار عن الملف. طبعاً يمكن أن لا تحوي الدارة على مفتاح يدوي ميكانيكي على الإطلاق، وبدلاً من ذلك توجد فيها عناصر أخرى (مثل الترانزستورات والثايرستورات وغيرها) لأن هذه العناصر يمكن أن تستخدم لقطع التيار عن ملف الحاكمة.

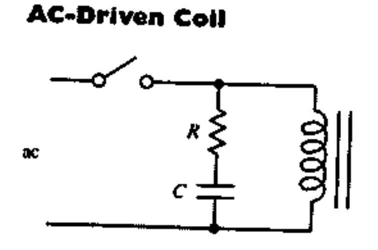
الملفات ذات التفعيل بالجهد المستمر

يوضع ديود بحيث يكون مستقطباً عكسياً على التوازي مع ملف الحاكمة ويمنع هذا الديود نشوء ومضات أو قفزات الجهد العالي على الملف لأن الديود ينتقل إلى حالة (on) قبل أن يصل الجهد بين طرفي الملف إلى قيم عالية جداً. يجب أن يتم اختيار الديود بحيث يتحمل مرور تيار عبره يساوي التيار النظامي الذي كان يمر في الملف قبل قطع تيار الملف. الديود 1N4004 متعدد الاستخدامات مناسب جداً للاستخدام في مثل هذه الدارات.



الملفات التي تفعل بالجهد المتناوب

لا يمكن استخدام ديود مع ملفات الحواكم التي تقاد بالجهد المتناوب، لأن الديود ينقل إلى حالة تمرير في أحد أنصاف الدور المتناوب كما أن استخدام ديودين على التعاكس والتوازي لا يحقق المطلوب، لأن التيار في هذه الحالة لا يمر نهائيا عبر الملف. تستخدم دارة RC تسلسلية توصل على التوازي مع ملف الحاكمة وفيها يقوم المكثف بامتصاص الشحنة الزائدة وتساعد المقاومة على التحكم بالتفريغ. يمكن أن تعمل الدارة بشكل جيد باختيار ($C = 0.05\ \mu F$) و $R = 100$ (Ω) وذلك في حالة الأحمال الصغيرة التي تقاد من جهد شبكة المدينة.

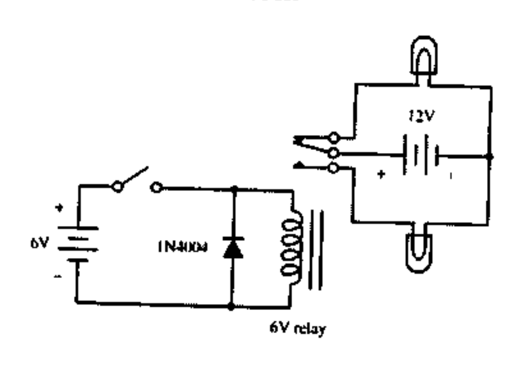


الشكل (41.3): نماذج من دارات كبت الحالات العابرة في دارات الحواكم.

3.4.3 بعض دارات الحواكم البسيطة

مفتاح يُفعّل بالجهد المستمر

تستخدم في الشكل (42.3) العلوي دارة حاكمة تيار مستمر تماساتها من نوع SPDT لتوصيل التيار إلى أحد مصباحين. عندما يكون مفتاح وصل التغذية إلى ملف الحاكمة في حالة (off) لا يمر تيار في ملف الحاكمة وتكون تماسات الحاكمة في حالة راحة ويمر التيار عبر المصباح العلوي. عند إغلاق مفتاح تغذية ملف الحاكمة يمر تيار في ملف الحاكمة فتجذب الصفيحة المتحركة وتغيّر تماسات الحاكمة وضعياتها ويمر التيار عبر المصباح السفلي. يُستخدم ديود في الدارة على التوازي مع ملف الحاكمة من أجل كبت الحالة العابرة يجب اختيار كافة عناصر الدارة بحيث تتحمل الجهود والتيارات.



الشكل (42.3): بعض دارات الحواكم البسيطة

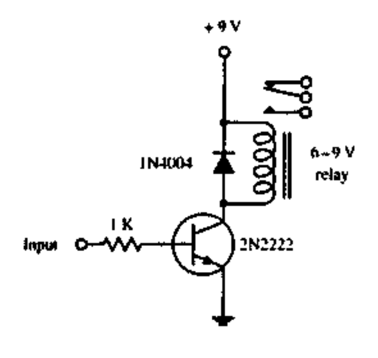
مفتاح يُفعل بالجهد المتناوب

AC-Actuated Switch

في هذا الشكل تستخدم حاكمة تفعل بالجهد المتناوب لوصل تيار متناوب إلى أحد مصباحين يعملان بالجهد المتناوب. سلوك هذه الدارة مشابه تماماً لسلوك الدارة السابقة، ولكن كافة الجهود والتيارات في هذه الدارة متناوبة. تستخدم هنا مقاومة (100 Ω) على التسلسل مع مكثف (0.05 µF) موصولان مع ملف الحاكمة على التوازي لكبت الحالة العابرة، وعند اختيار قيم العناصر يجب الانتباه إلى أنها قادرة على تحمُّل تيار يساوي التيار الذي يمر في ملف الحاكمة في حالة العمل المستقر.

دارة قيادة حاكمة





تستخدم هذه الدارة عند الرغبة بقيادة الحاكمة بواسطة إشارة تحكم، ويعمل الترانزستور npn كأداة تحكم بمرور التيار عبر ملف الحاكمة. عند عدم تطبيق جهد على قاعدة الترانزستور أو عند عدم مرور تيار عبر قاعدته فإن الترانزستور يكون في حالة قطع ولا يمر تيار عبر مجمعه ولا عبر ملف الحاكمة وتكون الحاكمة في حالة راحة، أما عند تطبيق جهد على القاعدة يمر تيار كاف في القاعدة فإن الترانزستور ينتقل إلى حالة تمرير (إشباع) ويمر تيار عبر ملف الحاكمة ومجمع الترانزستور وتُفعَّل الحاكمة.

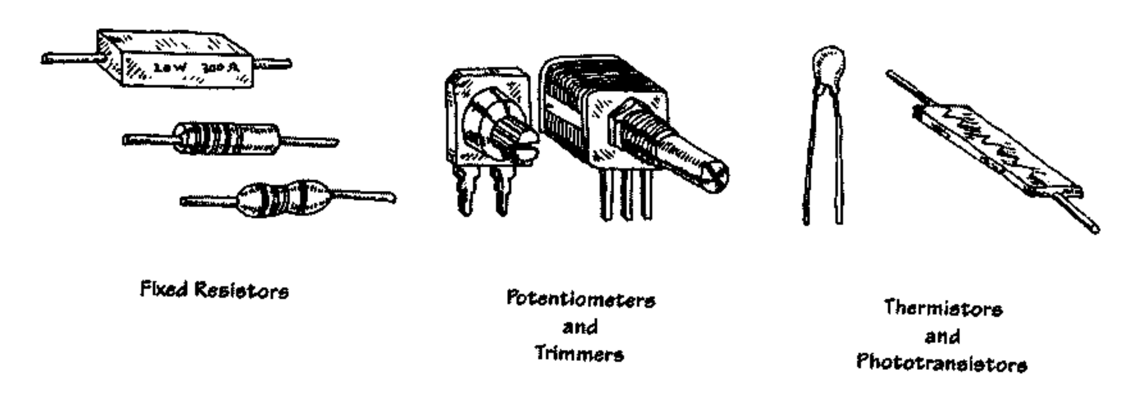
تابع الشكل (42.3): بعض دارات الحواكم البسيطة

5.3 المقاومات

المقاومات هي عناصر كهربائية تستخدم للحد من مرور التيار في الدارة وفي بعض الأحيان من أجل تخفيض مستويات الجهد ضمن الدارة وتعطى العلاقة بين الجهد المطبق بين طرفي المقاومة (V) والتيار المار فيها (I) بالمعادلة

$$V = I R$$

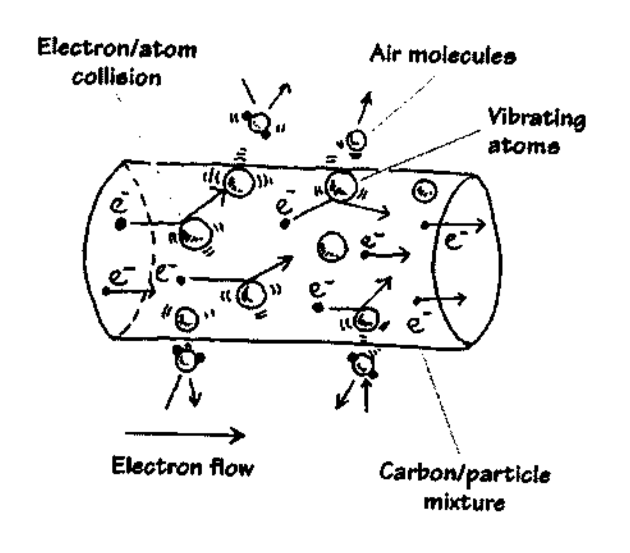
للمقاومات تطبيقات عديدة منها تحديد التيارات ومستويات الإشارات في الدارات، تأمين انخفاض للجهد، ضبط قيمة الربح بشكلٍ دقيق في دارة دقيقة، كما تستخدم كعناصر تفرعية أو تسلسلية مع مقاييس التيار ومقاييس الجهد هذا بالإضافة إلى استخداماتها كعناصر تخميد (damping) في دارات الهزازات. تستخدم المقاومات أيضاً كمقاومة تحميل للخطوط أو الممرات (buses) في الدارات الرقميَّة أو كعناصر تغذية عكسيَّة في المضخمات. يمكن أن تكون المقاومات من النوع ذي القيمة الثابتة (قيمة المقاومة ثابتة fixed resistor)، أو أن تكون من النوع المتغيِّر. توجد أيضاً مقاومات تتغيَّر قيمها حسب شدة الضوء الساقط عليها وتسمى مقاومات ضوئية، ومقاومات تتغير قيمها حسب الحرارة وتسمى مقاومات حرارية (thermistors).



الشكل (43.3): نماذج من مقاومات ثابتة ومتغيرة وضوئية وحرارية.

1.5.3 كيف تعمل المقاومة

يتميَّز التيار الكهربائي بحركة الإلكترونات ذات الطاقة الحركية ووظيفة المقاومة في الدارة هي امتصاص بعض هذه الطاقة وتحويلها إلى نوع أو شكل آخر من أشكال الطاقة. عندما تدخل الإلكترونات أحد أطراف المقاومة فإن بعض هذه الإلكترونات تتصادم مع ذرات مادة المقاومة وتنتقل بذلك بعض طاقة هذه الإلكترونات إلى ذرات مادة المقاومة التي تخضع لاهتزازات ذرية (atomic vibrations)، هذه الاهتزازات الذرية تعمل كالطبل (drum) وتنقل طاقتها إلى الهواء المحيط أو ربما إلى جسم معدني يحيط بالمقاومة ويعمل كجسم تبريد لها. تؤدي التصادمات ضمن المقاومة بالمحصلة النهائية إلى تيار ذي طاقة أخفض.



الشكل (44.3): شكل لتوضيح مبدأ عمل المقاومة.

تعتبر المقاومة الملفوفة سلكياً (مقاومة مصنوعة من سلك ملفوف) مثالاً حياً عن المقاومات. تتكون هذه المقاومة من سلك مقاوم (resistive wire) وتزداد مقاومته الكلية بزيادة طوله. يُلف السلك المقاوم على اسطوانة عازلة لزيادة متانة المقاومة. يستخدم مزيج من الكربون ومادة لاصقة شبيهة بالغراء لتكوين المقاومات ذات البنية الكربونية، وبإضافة المزيد من الكربون إلى المدة تصبح أقل مقاومة. أما في بعض المقاومات المعدنية فتستخدم شرائح معدنية (metal films) أو خلائط معدنية أو بعض الأنواع الأخرى من العناصر المقاومة.

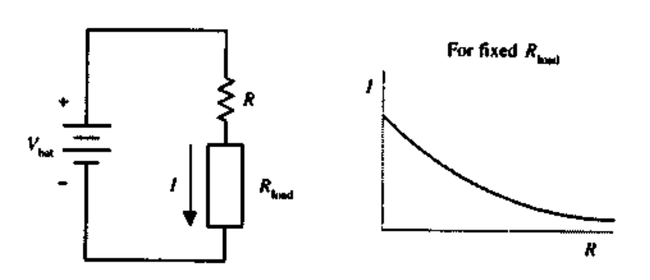
2.5.3 بعض الاستخدامات الأساسية للمقاومات

نبيِّن فيما يلي بعض الدارات الهامة جداً التي تستخدم غالباً ضمن الدارات المعقدة.

محدِّد التيار

تستخدم مقاومة (R) موصولة تسلسلياً مع مقاومة الحمل (R_{Load}) من أجل تخفيض التيار (I) عبر الحمل. بزيادة (R) ينخفض التيار (I) وبنفس الوقت ينخفض الجهد على الحمل (انظر المثال التالي للتعرف على ميزات مقسِّم الجهد).

$$I = \frac{V_{bat}}{R + R_{Load}}$$

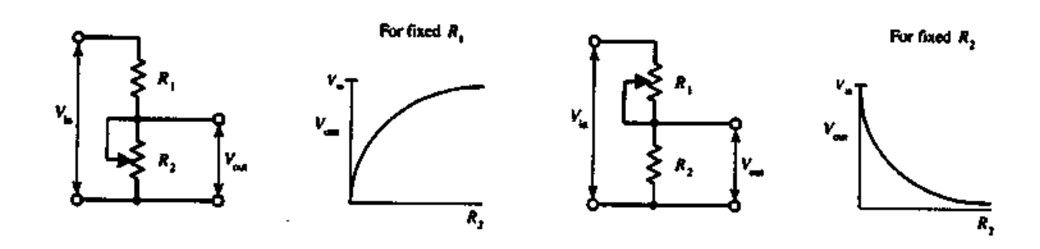


الشكل (45.3): دارة محدِّد تيار.

مقسِّم الجهد

إن علاقة مقسم الجهد هي التي تصف جهد الخرج بدلالة جهد الدخل وقيم المقاومات وهذه العلاقة هي:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in}$$

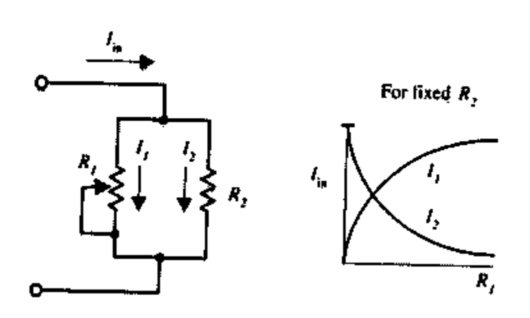


تابع الشكل (45.3): دارة مقسم جهد.

مقسم التيار

عند دخول التيار (Iin) إلى العقدة العلوية في دارة مقسِّم التيار فإنه يتفرع إلى (I1) يمر في (R1) و(I2) يمر في (R2). إذا زادت قيمة المقاومة (R1) فإن التيار (I1) يتناقص ويزداد التيار (I2). تبيِّن المعادلات والمنحني المعطى كيفية تغيُّر التيار عبر R1 وR2 بتغيُّر قيمة المقاومة R1.

Current Divider



تابع الشكل (45.3): دارة مقسّم تيار.

3.5.3 نماذج من المقاومات الثابتة

المقاومات الكربونية الرقيقة

تعتبر هذه المقاومات من أكثر أنواع المقاومات شيوعاً واستخداماً. يتم تصنيع هذه المقاومات بترسيب طبقة كربونية رقيقة على اسطوانة صغيرة من السيراميك. يُشكَّل أخدود لولبي صغير في طبقة الكربون فيحدِّد هذا الأخدود مقدار الكربون بين طرفي المقاومة وبالتالي قيمة هذه المقاومة. تمتاز هذه المقاومات بوثوقية عالية كما أنها مناسبة جداً لعمليات اللحام، وهي مستقرة بالنسبة للضجيج ومقاومة للرطوبة والحرارة. تتراوح معدلات استطاعة هذه المقاومات بين (1/4) و2 W، أما قيم هذه المقاومات فتتوفر في مجال يتراوح بين (10 Ω) و(1 MΩ) بسماحيات (tolerances) حوالي ±5 %.

Carbon Film

4-band code — Typical yellow or tan jacket — Peanut shape

المقاومات ذات البنية الكربونية

المقاومات ذات التركيب الكربوني هي نوع آخر شائع الاستخدام كثيراً ويصنع من مزيج من بودرة الكربون (Carbon Powder) التي تخلط مع مادة لاصقة تشبه الغراء. عند الرغبة في زيادة المقاومة تقلل كمية الكربون في الخليطة.

تبدي هذه المقاومات أداءً حسب المتوقع، وتحريضية قليلة، وسعة منخفضة.

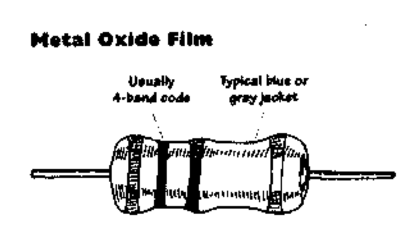
تتراوح معدلات استطاعات هذه المقاومات بين (1/8) و(2 W)، أما قيم المقاومات فتتراوح بين (1 Ω) و(100 MΩ) بسماحية ±5 %.

Carbon Composition

Usually 5-band code — Typical brown jacket — Straight cylinder

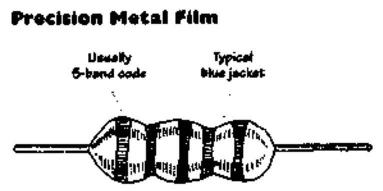
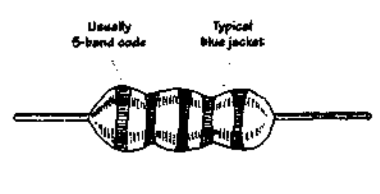
الشكل (46.3): أنواع المقاومات الثابتة.

مقاومات أوكسيد المعدن



مقاومات أوكسيد المعدن هي أيضاً من المقاومات شائعة الاستخدام وتتكون من نواة سيراميكية (Ceramic Core) مغطاة بطبقة رقيقة من أوكسيد المعدن. تعتبر هذه المقاومات مستقرة ميكانيكياً وكهربائياً. تُطلى هذه المقاومات بدهان خاص لمقاومة اللهب، ولمقاومة المحاليل المذيبة (Solvents) والحرارة والرطوبة (Humidity). تتراوح القيم النموذجية لهذه المقاومات بين (1 Ω) و (200 KΩ) بسماحيات نموذجية ±5 %.

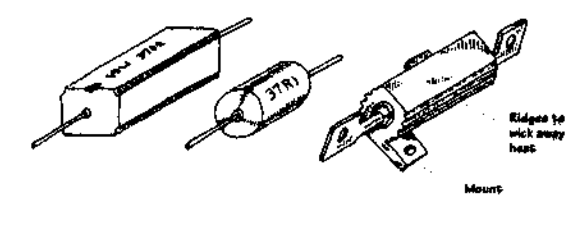
المقاومات المعدنية الدقيقة

يتميّز هذا النوع من المقامات بالدقة العالية جداً وبالانخفاض الكبير جداً للضجيج الذاتي. تتكون هذه المقاومات من شريحة سيراميكية مغلفة بطبقة معدنية رقيقة ويغلف كل ذلك بطبقة خارجية كتيمة. تستخدم هذه المقاومات في الأجهزة الدقيقة كأجهزة الاختبار، والأجهزة التشابهية والرقمية وكذلك في الأجهزة الصوتية وأجهزة الفيديو. تتراوح قيم هذه المقاومات بين (10 Ω) و(2 MΩ) بمعدلات استطاعة تتراوح بين (1/8 W) إلى حوالي (1/2 W) وبسماحية ±1 %.

مقاومات الأسلاك الملفوفة عالية الاستطاعة

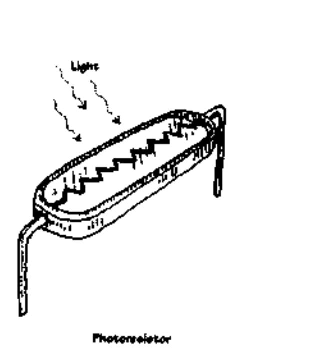


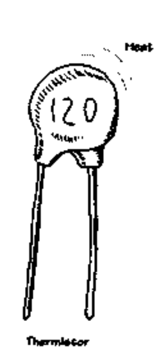


تستخدم هذه المقاومات في التطبيقات عالية الاستطاعة وبعض أنواعها مغلف بطلاءٍ من الزجاج أو الأسمنت (Cement) أو مغلف بالألمنيوم.

يتكون الجزء المقاوم في هذه المقاومات من سلك مقاوم ملفوف حول أسطوانة من السيراميك، وهذه المقاومات هي أكثر الأنواع متانة وتحملاً لظروف العمل وتمتاز بقدرة عالية على تبديد الحرارة وباستقرارية حرارية عالية. تتراوح قيم هذه المقاومات بين (0.1 Ω) و(150 KΩ) أما معدلات استطاعتها فتقع بين (2 W) و(500 W) أو أكثر من ذلك.

المقاومات الحرارية والضوئية



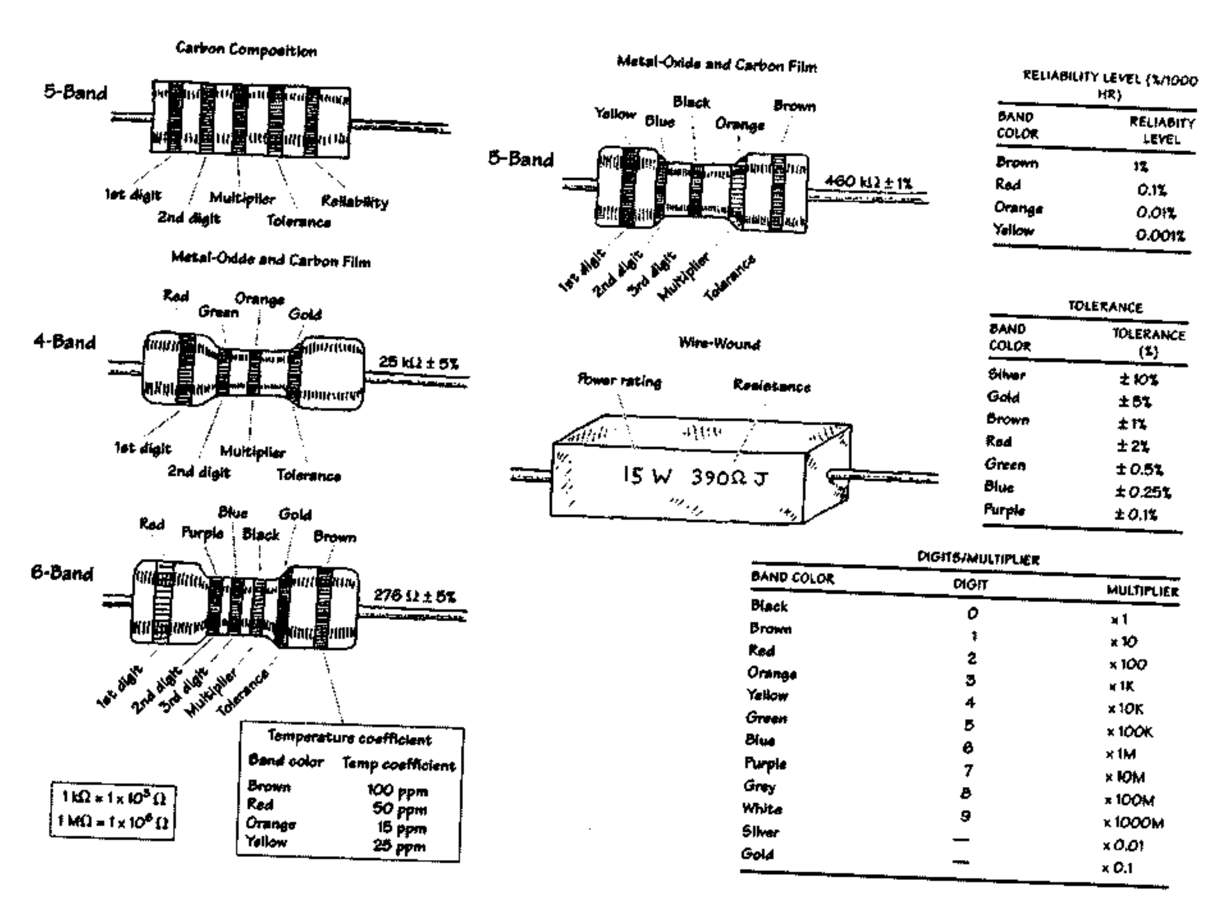


وهي أنواع خاصة من المقاومات التي تتغيَّر قيمتها عند تسليط الضوء عليها إذا كانت ضوئية أو عند تعرضها للحرارة إذا كان حرارية. تصنع المقاومات الضوئية من مواد نصف ناقلة مثل كبريت الكادميوم (Cadmium Sulfide). وبزيادة مستوى الإضاءة تنخفض المقاومة. سوف تُغطى المقاومات الضوئية وتدرس بتفصيل أكثر في الفصل الخامس. المقاومات الحرارية (Thermistors) هي مقاومات حساسة لتغيرات درجات الحرارة وبزيادة درجات الحرارة تنخفض هذه المقاومات (في أغلب الحالات).

تابع الشكل (46.3): أنواع المقاومات الثابتة.

4.5.3 الكتابات والرموز على المقاومات

تُستخدم سلسلة من الخطوط الملونة أو القيم المكتوبة على المقاومات لتحديد قيمها. كما توجد رموز وكتابات أخرى على المقاومات تدل على نسبة السماح في قيمة المقاومة ونسبة السماح (tolerance) هي نسبة الانحراف بين القيمة المكتوبة أو المرمزة والقيمة الفعليّة. كما يُعطى على المقاومات، ولكن ليس بشكلٍ دائم، معدَّل عامل الحرارة ومعدَّل مستوى الموثوقية (reliability level) ويُقصد بالموثوقية، قدرة المقاومة على الحفاظ على نسبة التسامح خلال فترة عمل تساوي (1000) ساعة. نبيِّن في الشكل (47.3) مخططات لأغلب طرق الكتابة والترميز على المقاومات.



Temperature coefficient	
Band color	Temp coefficient
Brown	100 ppm
Red	50 ppm
Orange	15 ppm
Yellow	25 ppm

RELIABILITY LEVEL (%/1000 HR)

BAND COLOR	RELIABILITY LEVEL
Brown	1%
Red	0.1%
Orange	0.01%
Yellow	0.001%

TOLERANCE

BAND COLOR	TOLERANCE (%)
Silver	± 10%
Gold	± 5%
Brown	± 1%
Red	± 2%
Green	± 0.5%
Blue	± 0.25%
Purple	± 0.1%

DIGITS/MULTIPLIER

BAND COLOR	DIGIT	MULTIPLIER
Black	0	x 1
Brown	1	x 10
Red	2	x 100
Orange	3	x 1K
Yellow	4	x 10K
Green	5	x 100K
Blue	6	x 1M
Purple	7	x 10M
Grey	8	x 100M
White	9	x 1000M
Silver	—	x 0.01
Gold	—	x 0.1

الشكل (47.3): الكتابات والرموز اللونية على المقاومات ومدلولاتها.

5.5.3 معدلات استطاعة المقاومات

يمكن أن يكون لمقاومتين نفس القيمة (قيمة المقاومة resistance value) ولكن معدلات الاستطاعة مختلفة، فالمقاومات ذات معدَّل الاستطاعة الأعلى تستطيع تبديد الحرارة الناتجة عن مرور التيار بكفاءة أكبر. إذا استبدلت مقاومة في دارة بمقاومة لها نفس القيمة ولكن معدَّل استطاعتها أقل، فإن المقاومة البديلة قد تنصهر. يُساعدك المثال التالي على معرفة معدَّل استطاعة المقاومة التي يجب أن تستخدمها في تطبيقٍ ما، إذا كنت لا تعلم ذلك قبل الآن.

مثال:

احسب معدَّل استطاعة المقاومة اللازمة إذا كان التيار الذي يمر في المقاومة يساوي (10 mA) وقيمتها (3300 Ω).

من أجل تحديد معدَّل استطاعة المقاومة يجب حساب الاستطاعة التي تتحول إلى حرارة في المقاومة من العلاقة:

$$P = I^2 R = (0.01\ A)^2\ (3300\ \Omega) = 0.33\ W$$

0.01 A

3300Ω

الشكل 3.48

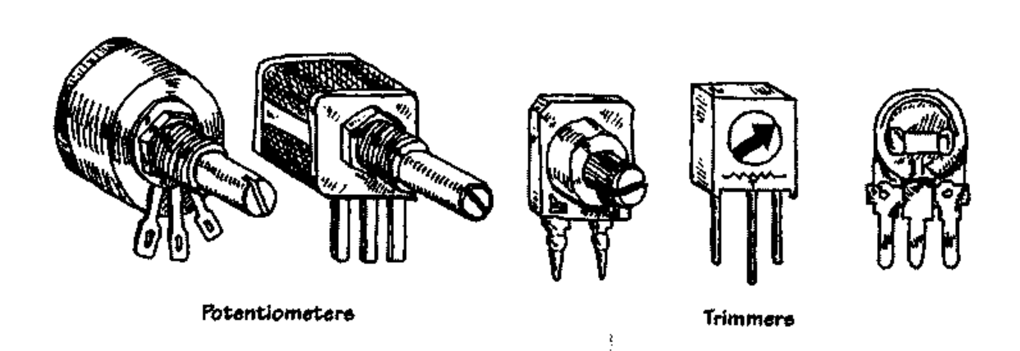
وعندها تُلاحظ أن المقاومة اللازمة يجب أن تكون على الأقل ذات معدَّل استطاعة (0.33 W)، وطبعاً من الأفضل أن يكون معدَّل الاستطاعة أكبر لضمان الأمان أثناء العمل. تتوفر عادة مقاومات بمعدلات استطاعة (1/8 W)، أو (1/4 W)، أو (1/2 W)، أو (1 W) أو (2 W) أو أكبر من ذلك.

في هذا المثال نختار مقاومة بمعدَّل استطاعة (1/2 W).

يجب استخدام القيم المنتجة للجهود والتيارات عند حساب معدَّل استطاعة المقاومة (على سبيل المثال $P = I_{rms}^2 . R$ أو $P = \frac{V_{rms}^2}{R}$).

6.5.3 المقاومات المتغيرة

تؤمن المقاومات المتغيرة تغيراً في قيم المقاومات، ويمكن أن تُضبط قيمة المقاومة بتدوير مسكة (Knob) أو مقبط المقاومة، ويبيِّن الشكل (49.3) بعض نماذج هذه المقاومات.

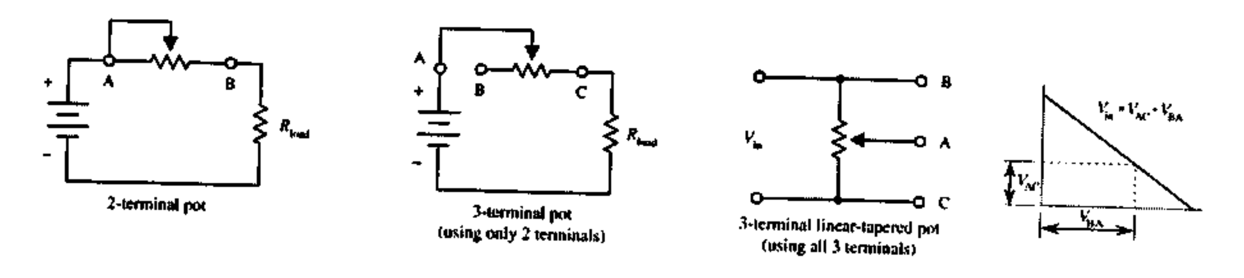


الشكل (49.3): بعض نماذج المقاومات المتغيرة.

تسمى المقاومة متغيرة حسب نوعها واستخدامها إما مقسم جهد (potentiometer) أو مقاومة متغيرة (rheostat) أو (trimmer) وسنبيِّن فيما يلي مدلول ومعنى كل تسمية من هذه التسميات. مقسمات الجهد (potentiometers) والمقاومات المتغيرة (rheostat) هي في الواقع نفس الشيء ولكن الـــ rheostat تصمم في العادة للتعامل مع جهود وتيارات متناوبة (ac) عالية القدرة وعند تصميم مقسمات الجهد والمقاومات المتغيرة تؤخذ بالاعتبار كثرة عمليات تغيير هذه المقاومات (إذن هذه المقاومات هي من النوع الذي تغيَّر قيمته كثيراً أثناء الاستخدام). أما الـــ trimmers فهي نوع من المقاومات المتغيرة الصغيرة والتي تُضبط قيمتها مرة أو عدة مرات ثم تترك على حالها وتتوفر هذه المقاومات المتغيرة بأرجلٍ تصلح للتركيب على الدارات المطبوعة. تستخدم الـــ Trimmers في عمليات التوليف الدقيق للدارات كأن تستخدم مثلاً لتوليف دارة وإعادة ضبطها بعد مرور فترة من الزمن على عملها، لأن فترات العمل الطويل تغيِّر بعض ثوابت وقيم عناصر

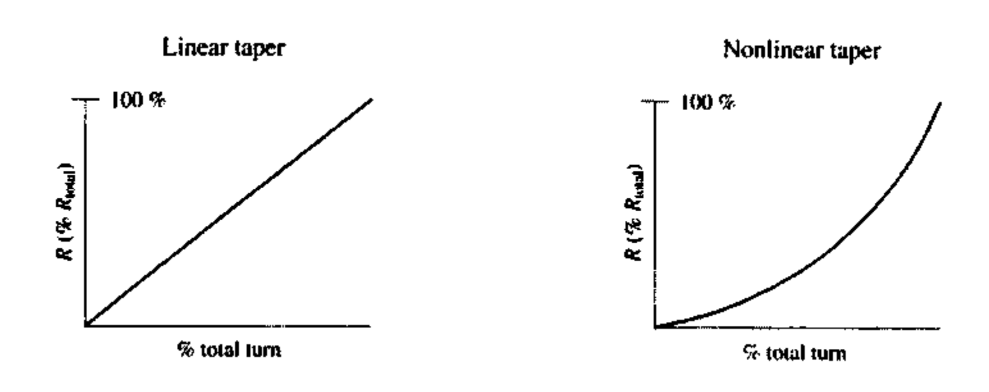
الدارة، فلابد من إعادة الضبط، ويتم ذلك بواسطة الـ Trimmers. توضع عادة عناصر الضبط في حجيرة مغلقة وقد تكون مخفيَّة ضمن الجهاز. يمكن أن يكون للمقاومة المتغيرة طرفان (رجلان) أو ثلاثة أطراف (ثلاث أرجل).

ويبيِّن الشكل (50.3) رموز ودارات بعض المقاومات المتغيرة.



الشكل (50.3): بعض دارات المقاومات المتغيرة.

عند شراء مقاومة متغيرة من الضروري فهم الفرق بين المقاومة المتغيرة الخطية والمقاومة المتغيرة غير الخطيّة ومعنى ذلك هو ببساطة كيفية تغيُّر قيمة المقاومة عند تدوير مقبض (أو مسكة) المقاومة المتغيرة، فعند تدوير هذا المقبض أو تلك المسكة فإن ذراعاً أو تماساً مترلقاً يتحرك على جسم المقاومة ويبيِّن الشكل (51.3) علاقة قيمة المقاومة بعدد لفات أو دورات أو زاوية دوران المقبض المتحرك لمقاومة متغيرة خطياً ولمقاومة تتغيَّر بشكل غير خطي.



الشكل (51.3): تغيرات المقاومات المتغيرة الخطية واللاخطيّة عند تغيير وضع مقبض الضبط.

ولكن يمكن أن يتساءل القارئ، لماذا توجد مقاومات متغيرة غير خطية؟ في الواقع تتلقى أعضاء جسم الإنسان تغيرات شدات الإشارات بطرق مركبة، كتغيرات الصوت وتغيرات شدة الضوء، فربما تفكر أن مضاعفة شدة الصوت أو شدة الإضاءة تؤدي إلى إدراك مضاعف للصوت أو للإضاءة. ولكن ولسوء الحظ ـــ وعلى الأقل بمفهوم الحدس والبديهة (وليس بمفهوم التحكم الآمن بأدمغتنا) فإن الحس البشري لا يعمل بهذه الطريقة. إن مداركنا للمشاهد (المناظر) والصوت تعمل بحيث أن إدراكنا للأصوات ولإضاءات المشاهد يتناسب مع اللوغارتم العشري لشدات الصوت أو الإضاءة التي تقاس بأجهزة قياس. لذلك وعندما تقوم ببناء مضخم لمجموعة من أجهزة الصوت (speakers) أو عندما تقوم بتجهيز دارة إضاءة مترل، عندها يكون من الحكمة استخدام مقاومات متغيرة غير خطيَّة.

6.3 المكثفات

تستخدم المكثفات كما لاحظت في الفصل الثاني من أجل التخزين المؤقت للشحنات الكهربائية ويوصف سلوك المكثف في الدارة بالعلاقة:

$$I = C\frac{dv}{dt}$$

وبشكل بسيط فإن هذه المعادلة تعني أنه إذا تم تزويد مكثف سعته (1 μF) بتيار يساوي 1 mA لمدة ثانية، فإن الجهد على طرفي المكثف سوف يزيد بمقدار (1000 V)، لأن $dv = I\frac{dt}{C}$. وبشكلٍ أكثر عمومية فإن هذه المعادلة توضح أن المكثف يمرر التيار عندما يكون الجهد المطبق بين طرفيه متغيراً مع الزمن (كالإشارات المتناوبة عالية التردد)، كما أن المكثف لا يمرر التيار إذا كان الجهد بين طرفيه ثابتاً (كالجهد المستمر مثلاً). تعطى ممانعة المكثف بالعلاقة ($Z = -j/\omega c$) أما طويلة ممانعة المكثف فهي ($X_c = 1/\omega c$) وعندما يرتفع التردد المطبق على المكثف إلى اللانهاية تنتهي طويلة الممانعة إلى الصفر، أما إذا كان تردد الجهد صفراً (جهد مستمر) فإن ممانعة المكثف تصل إلى اللانهاية وتبدو بالنسبة للتيار وكأنها مقاومة لا نهائية. طبعاً تتغير ممانعة المكثف بتغير قيمة سعته، فبزيادة السعة (C) تنخفض الممانعة ويزداد التيار. إن ميزة تغيُّر ممانعة المكثف بتغير تردد الجهد المطبق بين طرفيه تجعله مفيداً جداً كعنصر حساس للتردد في التطبيقات، فالمكثف يستخدم مثلاً في مقسمات الجهد الحساسة للتردد، أو كمكثف تمرير جانبي bypassing وكذلك يستخدم كعنصر حجب (blocking device). كذلك يستخدم المكثف في دارات الترشيح، وفي كبت الحالات العابرة في الدارات، وفي دارات المفاضلات والمكاملات. تستخدم المكثفات أيضاً في دارات ضاربات الجهد (voltage multipliers) وفي دارات الهزازات وفي فلاشات الكاميرات.

1.6.3 كيف يعمل المكثف

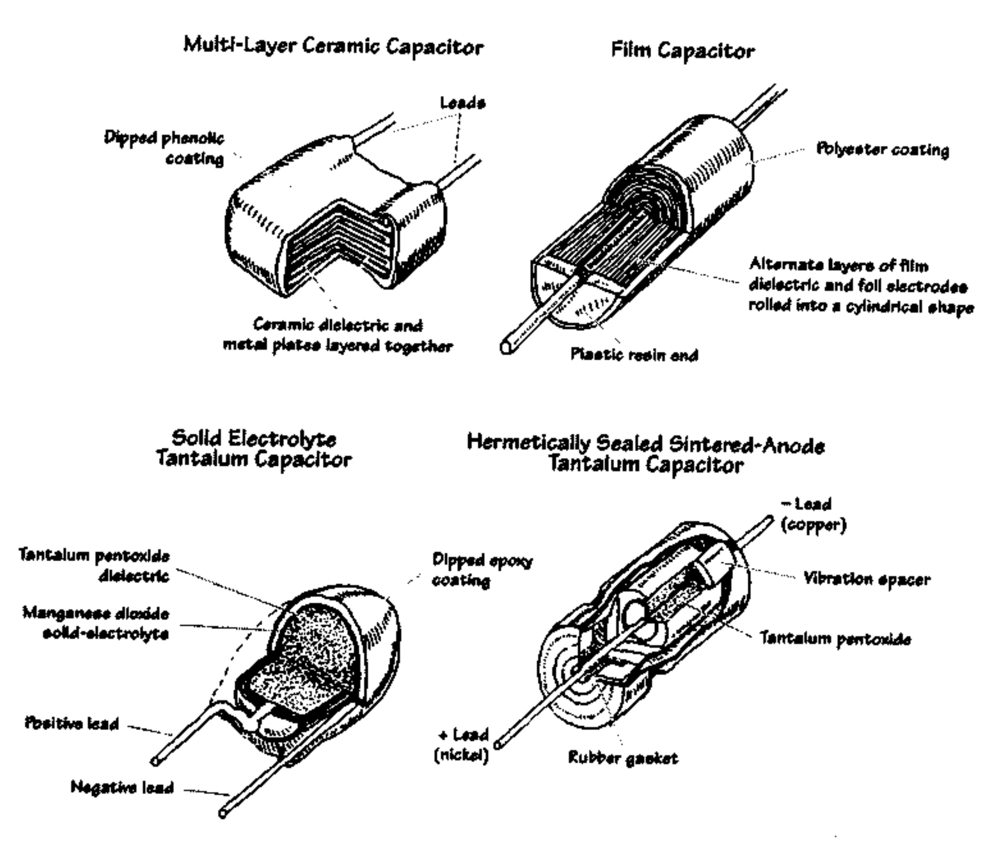
يتكون المكثف البسيط من صفيحتين متوازيتين وعند وصل الصفيحتين إلى مصدر جهد مستمر (كبطارية مثلاً) فإن الإلكترونات تُدفع من القطب السالب للبطارية إلى أحد أقطاب المكثف، أما إلكترونات القطب الآخر فإنها تجذب من القطب الموجب للبطارية. إذا أصبح فرق الشحنة بين قطبي المكثف كبيراً يمكن أن تنشأ شرارة بين القطبين وتفرِّغ المكثفة. يوضع عازل بين صفائح المكثف من أجل زيادة مقدار الشحنة التي يمكن خزنها في المكثف ويعمل العازل كمانع للشرارة. هناك عوامل أخرى تؤثر على سعة المكثف وهذه العوامل هي مساحة سطح صفيحتي المكثف، والمسافة الفاصلة بين الصفائح. يمكن أن يكون العازل المستخدم بين الصفائح من الورق (Paper) أو شريحة من البلاستيك (plastic film) أو الميكا (mica) أو الزجاج (glass)، أو السيراميك (ceramic)، أو الهواء، أما الصفائح فيمكن أن تكون من الألمنيوم (aluminum) أو شرائح من المعدن الموضوع على طرفي العازل. يمكن أن تترك تشكيلة الناقل ـــ عازل ـــ ناقل مسطحة، ويمكن أن تُلف كاسطوانة، والشكل (52.3) يبيِّن بعض الأمثلة عن المكثفات.

2.6.3 ملاحظة عن I = C dv/dt

من الجدير بالذكر أن الإلكترونات لا تنتقل عبر عازل المكثف من قطب إلى آخر وذلك حسب قوانين الفيزياء، ولكن وحسب المعادلة ($I = C\ (dv/dt)$) فإنه يبدو كما لو أن هناك تياراً يتدفق عبر المكثف. كيف يمكن أن يكون كل ذلك صحيحاً؟

في الواقع يمكن بسهولة فهم صحة ما ذكر من ملاحظة أن الأمر الذي قد يدعو إلى الشك هو اعتبار التيار (I) تياراً تقليدياً (conventional current) كالتيار الذي يمر عبر مقاومة أو عبر سلك. والتيار (I) في المكثف هو في الواقع تيار إزاحة (displacement current)، ويمثل تيار الإزاحة تياراً ظاهرياً عبر المكثف ناتجاً عن عملية شحن صفائح المكثف مع الزمن

وإنتاج حقل مغناطيسي يحرِّض الإلكترونات على الحركة في الصفيحة المعاكسة. تيار المكثف لا يمر نهائياً عبر العازل — وبدلاً من ذلك فإن الشحنات على إحدى الصفائح تدفع بتأثير الحقل المغناطيسي المتغيِّر الناتج عن الصفيحة الثانية والتأثير الكلي لهذه الظاهرة يجعل الأمر يبدو كما لو أن تياراً يمر عبر الفجوة.



الشكل (52.3): بعض نماذج المكثفات.

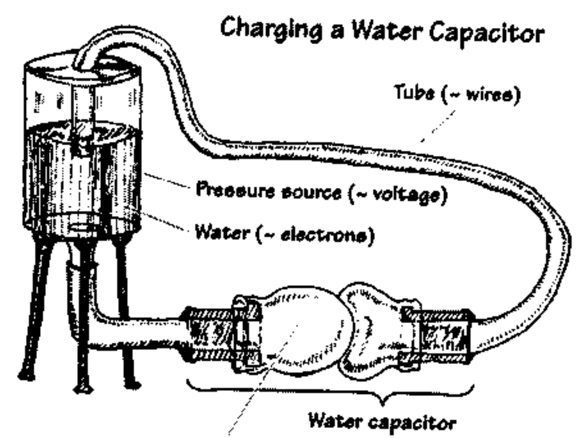
3.6.3 نموذج مائي مكافئ للمكثف

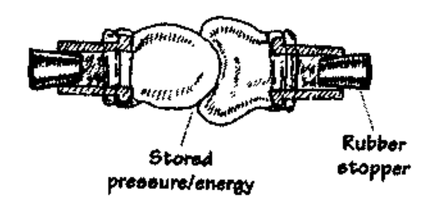
يبيِّن الشكل (53.3) أفضل نموذج مائي مكافئ للمكثف وفي هذا النموذج نفترض أن الإلكترونات في المكثف تماثل جزيئات الماء في النموذج وأن الجهد المطبق على المكثف يقابل ضغط الماء في النموذج المكافئ.

سوف نسمي النموذج المائي المكافئ للمكثف باسم المكثف المائي ويبنى المكثف المائي من بالونين. وفي الوضع الطبيعي يُملأ البالونان بنفس كمية الماء ويكون الضغط في البالونين متماثلا (وهذا الوضع مشابه لمكثف غير مشحون).

يُشحن المكثف الفعلي بواسطة بطارية، أما المكثف المائي فإنه يشحن بمضخة ماء أو يُشحن بواسطة مصدر ماء مضغوط. في المكثف الفعلي يكون هناك جهد بين طرفي المكثف، أما في المكثف المائي فيكون هناك فرق في الضغط بين البالونين. عند فصل مكثف فعلي عن بطارية فإنه يحتفظ بشحنته حيث لا يوجد مسار للتيار الذي يمكن أن يؤدي إلى التفريغ. إذا تم نزع المكثف المائي عن مصدر الماء المضغوط فلابد من افتراض سددات من الفلين موضوعة في الأنابيب الناقلة للمكثف المائي وأن المكثف المائي يحافظ على الضغط المخزون فيه. عند تطبيق جهد متناوب على طرفي مكثف فعلي، فإنه يبدو كما لو أن تياراً (تيار إزاحة) يمر عبر المكثف بسبب تغيرات الحقول المغناطيسيّة. عند تطبيق ضغط متناوب على أنابيب المكثف المائي فإن أحد البالونين سوف يُملأ بالماء ويدفع باتجاه البالون الآخر نصف المملوء ويؤدي إلى خروج الماء منه.

بزيادة تردد الضغط المطبق على المكثف المائي فإن المكثف المائي يبدو وكأنه غشاء مطاطي يخفق بسرعة إلى الأمام والخلف وهذا الخفقان يجعلِ المكثف المائي يبدو وكأنه دارة قصر (short circuit)، على الأقل بالنسبة للتيار المتناوب ac. هذه المقارنة مبسّطة جداً ولا توضح الكثير من الأمور الدقيقة التي تجري داخل المكثف وبالتالي لا يجب أن ينظر لهذه المقارنة إلا من جانبها البسيط.





الشكل (53.3): نموذج مائي مكافئ للمكثف.

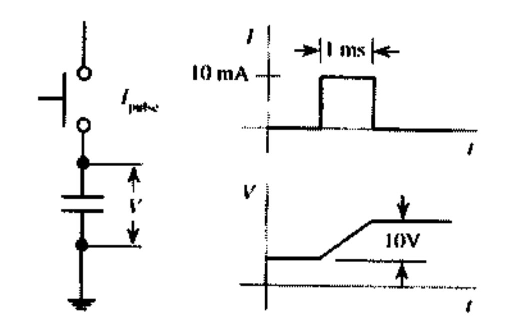
4.6.3 الوظائف الأساسية للمكثف

إدراك معنى $I = C\,dv/dt$

إذا تم تزويد مكثف سعته 1 μF بتيار 10 mA لمدة 1 mS فإن الجهد على المكثف سوف يزداد بمقدار 10 V ويمكن التأكد من ذلك باستخدام العلاقة:

$$I = C\frac{dv}{dt} \Rightarrow dv = \frac{I\,dt}{C} = \frac{(10mA)(1mS)}{1\mu F} = 10V$$

يبيِّن الشكل (54.3) دارة الشحن ونبضة التيار وتغيرات جهد الخرج.



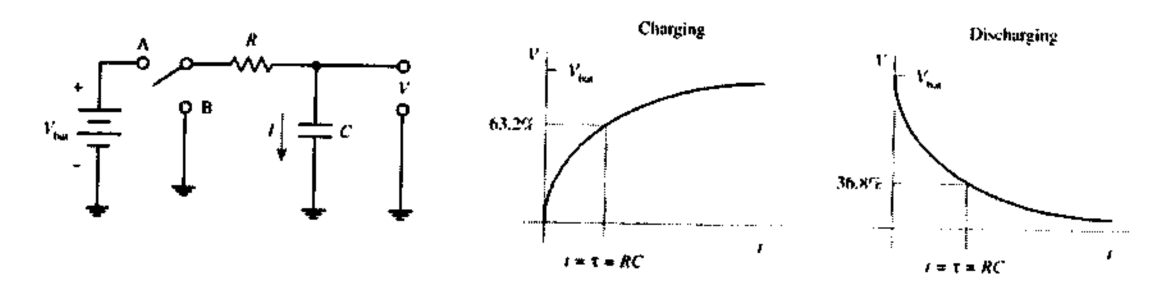
الشكل (54.3): تغيرات جهد المكثف عند تزويده بتيار لمدة زمنية محدودة.

شحن وتفريغ مكثف عبر مقاومة

عند إغلاق المفتاح على الوضع (A) يُشحن المكثف عبر المقاومة ويزداد الجهد بين طرفي المكثف وفقاً للشكل البياني المسمى منحني الشحن (charging).

وعند نقل المفتاح إلى الوضع (B) بعد شحن المكثف، فإن المكثف يفرّغ وينخفض الجهد بين طرفي المكثف وفقاً للشكل البياني المسمى منحني التفريغ (Discharging).

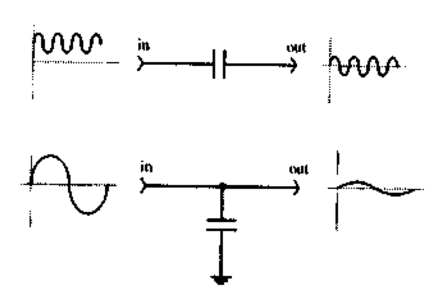
ولمزيد من التفصيلات عن الشحن والتفريغ راجع الفقرة (18.2).



تابع الشكل (54.3): شحن وتفريغ المكثف عبر مقاومة.

ترشيح الإشارات

عند تطبيق إشارة متناوبة محمولة على جهد مستمر على دارة عبر مكثف، فإن المكثف يمرر الإشارة المتناوبة ويحجب المركبة المستمرة. يُستخدم المكثف أيضاً لقصر الإشارات ذات الترددات غير المرغوبة إلى الأرض في الدارات الكهربائية والإلكترونية.

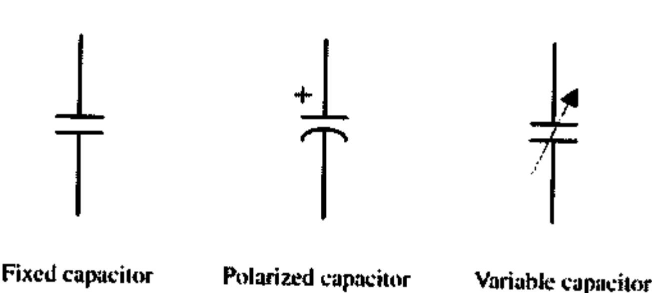


تابع الشكل (54.3): استخدام المكثف في الترشيح.

5.6.3 أنواع المكثفات

هناك أنواع مختلفة من عوائل المكثفات، ولكل واحدة منها ميزات مختلفة، فبعض المكثفات مناسبة جداً لتخزين مقدار كبير من الشحنة ولكنها ذات تيار تسريب كبير وذات تسامح كبير. تمتاز بعض العوائل الأخرى بتسامحات قليلة جداً وبتيارات تسريب منخفضة ولكن ليست لديها القدرة على تخزين شحنات كبيرة، كما أن بعض المكثفات الأخرى قادرة على

التعامل مع جهود عالية ولكنها كبيرة الحجم وغالية السعر وتوجد مكثفات لا تتحمل جهوداً عالية ولكنها تمتاز بتسامحات (tolerances) قليلة وبأداء ممتاز في مجال واسع لدرجات الحرارة. توجد مكثفات مستقطبة،و أخرى غير مستقطبة (nonpolarized capacitors). تُصمم المكثفات المستقطبة (بعكس المكثفات غير المستقطبة) للاستخدام في دارات الجهود المستمرة التي تحوي تموجات (أي للتقليل من تموجات الجهود المستمرة)، أما المكثفات غير المستقطبة فيمكن استخدامها في دارات الجهود المستمرة (dc) والمتناوبة (ac). للمكثف المستقطب طرف موجب وهذا الطرف يجب أن يُوصل مع نقطة أكثر إيجابية في الدارة من النقطة التي يوصل إليها الطرف الآخر لنفس المكثف الذي يكون سالباً. يمكن أن يؤدي الوصل الخاطئ للمكثف المستقطب في الدارة إلى تخريب المكثف. إن قيم السعات المستقطبة التي تستخدم فقط في دارات التيار المستمر المتعرِّج تكون عادة عالية نسبياً. تتوفر المكثفات بأنواع ذات قيم ثابتة (fixed) وأخرى ذات قيم متغيرة (variable)، ويبيِّن الشكل (55.3) رموز المكثفات الثابتة والمتغيرة.

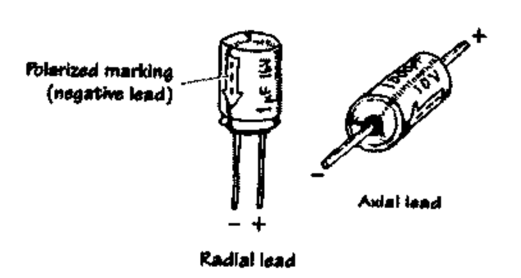


الشكل (55.3): رموز المكثفات الثابتة والمتغيرة.

ونتعرف الآن بتفصيل أكثر على عوائل المكثفات.

المكثفات الكيميائية

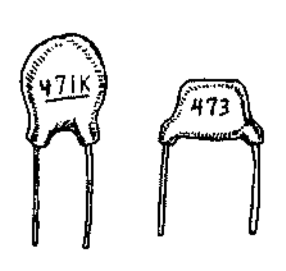
تحوي هذه المكثفات على محاليل الألمنيوم والتنتاليوم (Tantalium). وتكوَّن هذه المكثفات بالتشكيل الكهروكيميائي (electrochemical) لطبقة رقيقة من الأوكسيد (Oxide Film) على سطح معدني (metal surface) من الألمنيوم (aluminum) أو التنتاليوم. يُستخدم المعدن الذي يُشكَّل عليه الأوكسيد كمصعد (anode) أو كقطب موجب (positive terminal)، أما الأوكسيد فيشكل العازل (dielectric) أما السائل الناقل فإنه يعمل كمهبط أو طرف سالب. تكون نسبة السعة إلى الحجم في مكثفات التنتاليوم أكبر مقارنة مع مكثفات الألمنيوم، وأغلب أنواع المكثفات الكيميائية مستقطبة، وبمقارنة المكثفات الكيميائية مع غير الكيميائية نجد أن سعاتها أكبر ولكن تسامحاتها أسوأ (وتتراوح التسامحات بين (5) إلى % (20) لمكثفات التنتاليوم). كما أن الاستقرار الحراري للمكثفات الكيميائية أسوأ من المكثفات العادية، هذا بالإضافة إلى تيارات التسريب العالية فيها وزمن حياتها القصير. تتراوح قيم مكثفات الألمنيوم بين (1 μF) و(1 F) وقيم مكثفات التنتاليوم بين (0.001 μF) و(1000 μF)، أما معدلات جهود هذه المكثفات فتتراوح بين (6 V) و(450 V).



الشكل (56.3): أشكال بعض المكثفات.

مكثفات السيراميك

Ceramic



تعتبر المكثفات السيراميكية من الأنواع غير المستقطبة الشائعة جداً وهي صغيرة الحجم ومنخفضة السعر ولكن دقة هذه المكثفات غير عالية واستقرارها الحراري ضعيف. تحوي هذه المكثفات عازلاً من السيراميك وغلافها من الفينوليك.

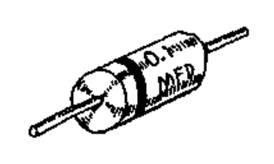
تستخدم عادة كمكثفات ربط (Coupling) وكمكثفات تمرير جانبي (bypass).

تتراوح تساهمات هذه المكثفات بين % 5± وقيم أعلى، أما قيمها فتتراوح بين (1 PF) و(2.2 µF). تتراوح الجهود الأعظمية التي تتحملها هذه المكثفات بين (3 V) و(6 KV).

مكثفات الميلار



Mylar



وهي مكثفات غير مستقطبة شائعة الاستخدام كثيراً وذات موثوقية لا بأس بها، كما أنها رخيصة الكلفة وتيارات تسريبها قليلة، إلا أن استقرارها الحراري ليس ممتازاً. تقع قيم مكثفات الميلار في المجال بين (0.001 µF) والـ (10 µF)، أما الجهود التي تتحملها فتتراوح بين (50 V) و(600 V).

مكثفات الميكا

Mica



تابع الشكل (56.3): أشكال بعض المكثفات.

تعتبر مكثفات الميكا من المكثفات عالية الدقة مع تيارات تسريب منخفضة جداً وتصنع من طبقات متعاقبة من شريحة معدنية ومن عازل الميكا وبعد ذلك تغلف المكثفة ككل. قيم هذه المكثفات صغيرة وتستخدم في دارات الترددات العالية (كما في دارات الترددات الراديوية RF Circuits)، وهي مستقرة جداً في ظروف عمل متغيرة من حيث درجات الحرارة والجهود. تتراوح سماحيات هذه المكثفات بين % 0.25± و% 5±، أما قيمها فتتراوح بين (1 PF) و(0.01 µF) وتتحمَّل هذه المكثفات جهوداً تتراوح بين (100 V) و(2.5 KV).

توجد أنواع أخرى من المكثفات كالمكثفات الورقية ومكثفات البوليستيرين Polystyrene ومكثفات البولي كاربونات (Polycarbonate) والبوليستر (Polyester) والزجاج والمكثفات الزيتيّة ويبيِّن الجدول (7.3) مواصفات هذه المكثفات، ولاحظ في هذا الجدول بأن ممانعة العازل العالية تعني تيار تسريب منخفضاً.

الجدول (7.3): ميزات أنواع مختلفة من المكثفات.

نوع المكثف	مجال السعة	الجهد الأعظمي	درجة حرارة العمل الأعظمية (°C)	التسامح (%)	مقاومة العازلة (MΩ)	ملاحظات
كيميائية ألمنيوم	1 µF-1 F	3-600 V	85	-20 إلى +100	<1	شائعة الاستخدام، تيارات تسريبها عالية، تسامحاتها قليلة
كيميائية تنتاليوم	0.001-1000 µF	6-100 V	125	20 إلى ±5	>1	
السيراميك	10 PF-1 µF	50-1000 V	125	100 إلى ±5	1000	شائعة الاستخدام، رخيصة تسامحاتها عالية
الميكا	1 PF ÷ 0.1 µF	100-600 V	150	±0.25 ÷ ±5	100,000	ممتازة الأداء، تستخدم في دارات الترددات العالية
الميلار	0.001 ÷ 10 µF	50 ÷ 600 V	-	جيدة	جيدة	شائعة الاستخدام وجيدة الأداء، ورخيصة
ورقي	500 pF ÷ 50 µF	100,000 V	125	±10 ÷ ±20	100	-
البوليسترين	10 pF-10 µF	100-600 V	85	±0.5	10,000	عالية الجودة، دقيقة جداً تستخدم في ترشيح الإشارات
البولي كربونات	100 pF ÷ 10 µF	50 ÷ 400 V	140	±1	10,000	عالية الجودة، دقيقة جداً
البوليستر	500 pF ÷ 10 µF	600 V	125	±10	10,000	-
الزجاج	10 ÷ 1000 pF	100 ÷ 600 V	125	±1 ÷ ±20	100,000	استقرارية طويلة الأمد
الزيت	0.1-20 µF	200 V ÷ 10 kV			جيدة	تستخدم في دارات الترشيح عالية الجهود، وعمرها طويل

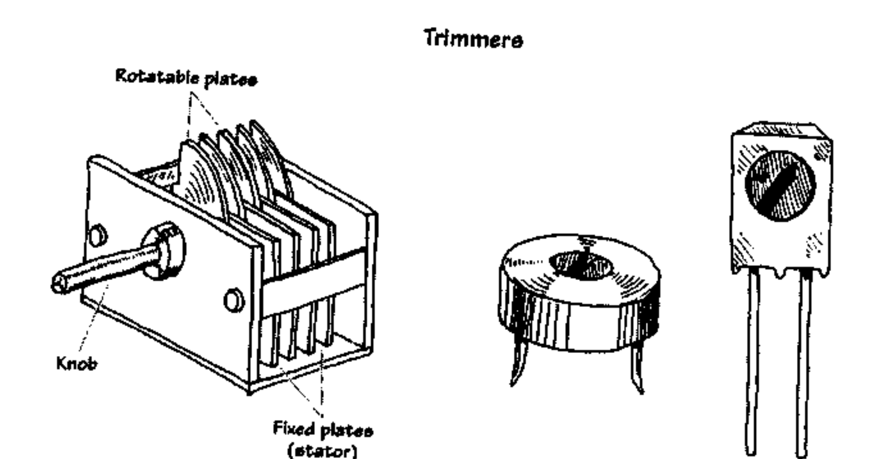
6.6.3 المكثفات المتغيرة

المكثفات المتغيرة هي عناصر يمكن تغيير قيم سعاتها بتدوير مسكة (مقبض) المكثف.

وتتوفر هذه المكثفات من أنواع ذات عازل هوائي أو من نوع يسمى مكثفات ضبط (trimmers) وفيها يتم ضبط السعة على قيمة معينة لمرة واحدة تقريباً (يمكن تكرار الضبط في حالات إعادة التوليف والمعايرة) ــ تتكون المكثفات الهوائية المتغيرة من مجموعتين من صفائح الألمنيوم، مجموعة منها ثابتة وتسمى (stator) ومجموعة دوارة تسمى (rotor) وتتداخل هذه الصفائح مع بعضها دون أن تتلامس وعند تدوير الصفائح الدوارة بواسطة ذراع تغيير سعة المكثف تتغيّر درجة التداخل بين الصفائح وتتغير السعة بسبب تغيُّر مساحة السطح الفعال لصفائح المكثف.

تستخدم المكثفات الهوائية المتغيرة في التطبيقات التي تحتاج إلى توليف كما هي الحال عند توليف جهاز الاستقبال اللاسلكي على أحد ترددات مجال العمل الواسع.

أما مكثفات الضبط (trimmers) فهي أصغر حجماً من المكثفات الهوائية وتستخدم كما ذكر سابقاً في عمليات الضبط قليل التكرار، كما هي الحال في الضبط الدقيق لأجهزة الاستقبال، وفي ضبط ترددات الهزازات، وضبط مميزات المرشحات). يمكن استخدام عوازل الميكا، أو الهواء، أو الزجاج في مكثفات الضبط وتستخدم فيها صفائح متداخلة لتغيير السعة أو آلية ضبط مناسبة تجبر الصفائح على الاقتراب من بعضها.



الشكل (57.3): نماذج لمكثفات متغيرة.

7.6.3 قراءة قيم المكثفات (ترميز المكثفات)

إن قراءة ترميزات المكثفات وقيمها ليست بسيطة لأن كل عائلة من عوائل المكثفات تستخدم نظام ترميز خاصاً بها. وبعض هذه النظم بسيط وسهل الفهم أما بعضها الآخر فيستخدم رموزاً وأرقاماً قد تؤدي أثناء التعامل معها إلى الوقوع في الخطأ. وأفضل طريقة لمعرفة معاني الرموز والكتابات الموجودة على مكثف تبدأ أولاً من معرفة العائلة التي ينتمي إليها المكثف. بعد ذلك يمكن مقارنة الكتابات والرموز الموجودة على هذا المكثف مع الطرق التقليدية للترميز المبينة في الشكل (58.3).

8.6.3 معلومات هامة يجب معرفتها عن المكثفات

يمكن أن يكون لمكثفين نفس السعة، ولكنهما يختلفان بالجهد، وإذا تم استبدال مكثف يتحمل جهداً معيناً بمكثف آخر له نفس السعة ولكن الجهد الذي يتحمله أقل، فإن الجهد العالي يؤدي إلى انهيار عازل المكثف البديل ويتحول العازل إلى مقاومة منخفضة ويفقد المكثف وظيفته. عليك دوماً أن تتذكر أن القطب الموجب للمكثف المستقطب يجب أن يوصل إلى نقطة أكثر إيجابية في الدارة من النقطة التي يوصل إليها الطرف السالب لنفس المكثف، وإلا فإن المكثف يسخن وترتفع درجة حرارته وقد ينفجر. كذلك يجب الانتباه إلى قيم تسامحات المكثفات فالمكثف الكيميائي من نوع الألمنيوم يمكن أن يكون ذا سعة أكبر أو أصغر بـ (20%) من قيمته الاسميّة التي يجب أن تكون القيمة الفعلية، ولذلك من الضروري عند استبدال المكثف الانتباه إلى قيمة التسامح، فإذا كان التطبيق يتطلب مكثفاً قليل التسامح، عندها يجب استبداله (حال تعطله) بمكثف له تقريباً نفس نسبة التسامح وطبعاً نفس قيمة السعة.

وأخيراً نذكر بملاحظة هامة جداً وهي أن لمس أرجل المكثفات ذات السعات الأقل من (0.01 μF) لا يشكل خطورة على الإنسان، ولكن عندما تكون سعات المكثفات أكبر من (0.1 μF) فإن لمس أرجل المكثفات يمكن أن يعرض الإنسان إلى صدمات كهربائية، فالمكثفات الكيميائية الكبيرة الموجودة في أجهزة التلفزيون وفلاشات كاميرات التصوير يمكن أن تخزن شحنات خطرة على حياة الإنسان، وكقاعدة عامة لا تلمس أرجل المكثف، وإذا كان لابد من ذلك فرّغ المكثف قبل لمس أرجله عن طريق وصل رأس مفك براغي بين طرفي المكثف (ضع رأس المفك بحيث يلامس طرفي المكثف فيفرّغ المكثف).

Electrolytic
(note, M here isn't a tolerance)
Label says: 100 MF
Actual value: 100 µF
(M means micro(µ))
100MF 16V

Tantalum
Label says: 4R7µ
Actual value: 4.7µF
(R represents a decimal)
+4R7µ

Label says: 475K
Actual value: 47 x 10⁵pF with 10% tolerance
(K = 10% tolerance)
+475K

Dipped Tantalum
Capacitance in MF — 10
Rated voltage — 16
= 10µF, 16V

Mylar
Label says: 0.1M
Actual value: 0.1µF
(M means micro)
0.1 MFD

Standard
(Black = military; white = commercial)
1st digit
2nd digit
Operating temp.
Vibration grade
Characteristic
Uses same color scheme as resistors for digits and tolerances
Tolerance
Multiplier
DC working voltage [Brown = 100V; Orange = 200V; Green = 500V; Gold = 1000V]
Front
Back

Ceramic
103M
Label represents a tolerance
Label says: 103M
Actual value: 0.01µF ±20%

2nd digit
3rd digit
1st digit
Tolerance
121K
Label says: 121K
Actual value: 120pF ±10%

Decimal
2nd digit
1st digit
Tolerance
4R7D
Label says: 4R7D
Actual value: 4.7pF ±0.5

European Marking
68p
Label says: 68p
Actual value: 68pF
p68
Label says: p68
Actual value: 0.68pF
n68
Label says: n68
Actual value: 0.68µF

Multipliers
0 = none
1 = × 10
2 = × 100
3 = × 1000
4 = × 10,000

Tolerance
Z = +80%, −20% (asymmetric capacitor construction)
M = ±20%
K = ±10% B = ±0.1%
J = ±5% A = ±0.05%
G = ±2%
F = ±1%
D = ±0.5%
C = ±0.25%
B = ±0.1%
A = ±0.05%

1pF = 1 × 10⁻¹²F
1nF = 1 × 10⁻⁹F
1µF = 1 × 10⁻⁶F

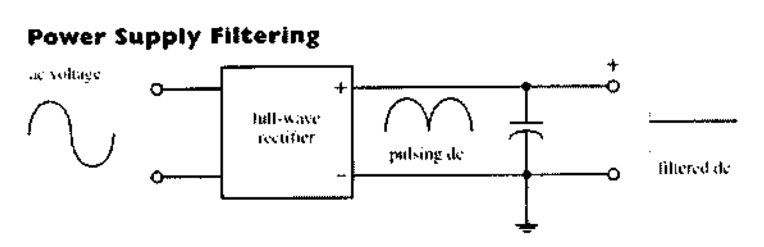
الشكل (58.3): معاني الرموز والكتابات الموجودة على أجسام المكثفات.

9.6.3 تطبيقات

الترشيح في مصادر التغذية

تستخدم المكثفات دوماً بعد دارات التقويم من أجل تنعيم شكل الجهد في خرج المقوّم حيث يقوم المكثف بقصر المركبات المتناوبة لجهد الخرج إلى الأرض.

أما المركبة المستمرة لجهد الخرج فتظهر في الخرج (انظر الشكل 59.3).



الشكل (59.3): مكثف ترشيح في مصدر جهد مستمر.

دارات المرشحات

يمكن بناء دارات مرشحات تمرير منخفض (Low-pass filters) ومرشحات تمرير عال (high-pass filter) بسيطة بواسطة شبكات RC بسيطة، ففي مرشح التمرير العالي يتم حجز المركبات منخفضة التردد بواسطة المكثف، أما المركبات عالية التردد فتمر عبر المكثف إلى الخرج. في مرشح التمرير المنخفض تُقصر الترددات العالية بواسطة المكثف إلى الأرض أما المركبات منخفضة التردد فتظهر على الخرج (انظر الفصل الثاني — الفقرة 30.2)، وللحصول على المزيد من المعلومات عن المرشحات عليك مراجعة الفصل الثامن.

Filter Circuits

HIGH-PASS FILTER

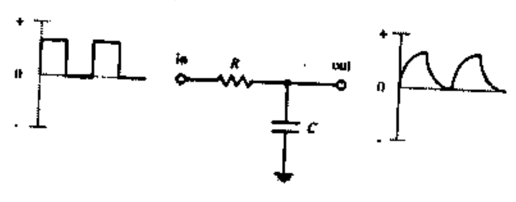
LOW-PASS FILTER

المكامل السلبي (غير الفعال)

في هذه الدارة تكامل إشارة الدخل أي أن إشارة الخرج هي تكامل إشارة الدخل.

يسمى الجداء RC باسم الثابت الزمني للدارة ويجب أن يكون هذا الثابت أكبر بعشر (10) مرات من دور (Period) إشارة الدخل، وإذا لم يتحقق ذلك فإن الدارة تعمل أيضاً كمرشح تمرير منخفض يحجب المركبات الترددية المنخفضة في إشارة الدخل من الوصول إلى الخرج.

Passive Integrator

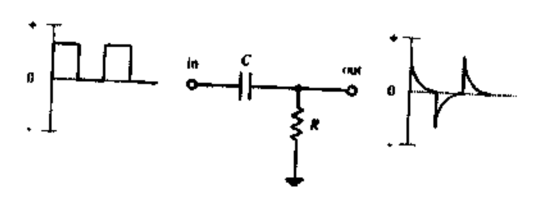


مفاضل سلبي (غير فعال)

تسمى هذه الدارة باسم دارة المفاضل، والإشارة التي تظهر في الخرج هي عبارة عن تفاضل لإشارة الدخل. ولكي تعمل هذه الدارة كدارة تفاضل فإن ثابتها الزمني (RC) يجب أن يكون (1/10) أو أقل من دور نبضات الدخل.

تستخدم دارات المفاضلات عادة للحصول على نبضات قدح (trigger pulses).

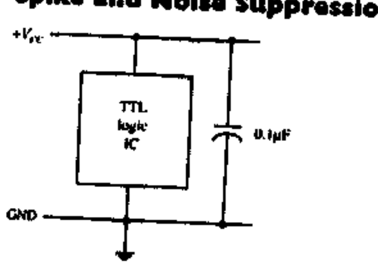
Passive Differentiator



كبت الضجيج والقفزات المفاجئة

عندما يتغير وضع الدخل أو الخرج في بعض الدارات المتكاملة (مثل دارات عائلة TTL مثلا)، فإن ذلك قد يؤدي إلى حدوث تغيرات كبيرة القيمة ولكن قصيرة الأجل في تيارات مصدر التغذية وهذا يؤدي إلى نشوء قفزات حادة وعالية التردد في خطوط مصدر القدرة. إذا كان هناك دارات وعناصر أخرى تُغذى من نفس مصدر التغذية، فإن هذه الومضات (Spikes) يمكن أن تؤدي إلى قدح خاطئ (false triggering) لهذه العناصر والدارات.

Spike and Noise Suppression



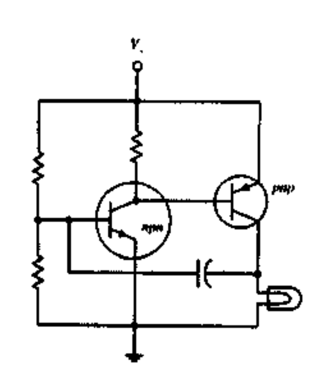
تابع الشكل (59.3): بعض دارات المكثفات.

يمكن لهذه الومضات أيضاً أن تولد إشعاعاً كهرومغناطيسياً غير مرغوب.

تستخدم مكثفات للتخلص من الومضات غير المرغوبة وتسمى هذه المكثفات باسم (decoupling capacitors). يُوصل المكثف (الذي تكون قيمته عادة بين (0.1) وحتى 1 µF وجهده أكبر من (5 V) لعائلة TTL) مباشرة بين موجب التغذية والأرض. يعمل المكثف على امتصاص الومضات ويُحافظ على مستوى ثابت للجهد (Vcc) ويمنع بذلك القدح الخاطئ والإشعاعات الكهرومغناطيسيَّة غير المرغوبة.

هزاز بسيط

يمكن استخدام المكثف في دارة هزاز، وفي هذه الدارة يعمل المكثف على تغيير جهد استقطاب قاعدة ترانزستور npn، ففي لحظة ما يتلقى الترانزستور استقطاباً كافياً لنقله إلى حالة (on) وبذلك يُنقل الترانزستور (pnp) أيضاً إلى حالة (on) لأن استقطاب قاعدته يصبح مناسباً للعمل في حالة (on)، ويمر تيار عبر المصباح الكهربائي ويتوهج المصباح. ولكن وبعد فترة فإن المكثف يُخزِّن شحنة كافية مما يؤدي إلى انخفاض جهد قاعدة ترانزستور الـ (npn) فينتقل إلى حالة (off) وينتقل ترانزستور الـ (pnp) أيضاً إلى حالة (off)، ولكن وبعد فترة من ذلك يفرِّغ المكثف شحنته عبر المقاومة السفلية الموصولة بين قاعدة ترانزستور الـ (npn) والأرض ويعود جهد قاعدته إلى قيمة كافية لنقله إلى حالة (on) وتتكرر دورة العمل السابقة من جديد. يتحدد تردد الاهتزاز بسعة المكثف وبقيم مقاومات مقسم جهد قاعدة الترانزستور npn.



تابع الشكل (59.3): دارة هزاز بسيط.

7.3 الملفات

ذكرنا في الفصل الثاني أن الملفات تعمل على مقاومة تغيرات التيار المتدفق عبرها وتمرر دون مقاومة تقريباً التيارات الساكنة، ويمكن وصف هذا السلوك للملفات بالعلاقة:

$$v = L.\frac{di}{dt}$$

ومن هذه المعادلة نلاحظ أنه إذا تغيَّر التيار المار في ملف (1 H) بمقدار (1 A/S) فإن جهداً قدره (1 V) ينشأ بين طرفي هذا الملف.

وقطبية الجهد الناشئ على الملف تكون باتجاه يعاكس تغيرات التيار.

فمثلاً إذا زاد التيار، فإن الجهد المتحرِّض على طرفيْ الملف يكون أكثر سلبية في النقطة التي يدخل عندها التيار إلى الملف، أما إذا انخفض التيار فإن الجهد المتحرض عند نقطة دخوله إلى الملف يكون أكثر إيجابية محاولاً المحافظة على تدفق التيار. وبشكل أعم يمكن القول إن العلاقة $v = L(di/dt)$ تقول إن الملف يرحب أو يحبذ (Like) مرور التيار عبره إذا كان الجهد بين طرفيه ثابتاً (مثلاً جهد مستمر) ويكره مرور التيار عند تغيُّر الجهد بين طرفيه. طبعاً المقصود بيحب ويكره فعلياً هو يقاوم أو لا يقاوم. إذن الملف يقاوم مرور التيار عند تطبيق جهد متناوب بين طرفيه لأن الجهد المتناوب متغيِّر. نعبر عن مقاومة الملف لمرور التيار عندما يكون الجهد بين طرفيه متغيراً بمفاعلة الملف ($X_L = \omega.L$) أو بممانعة الملف ($Z_L = j\omega L$). عندما يكون التردد صفراً تكون مفاعلة الملف صفراً ويعمل الملف في هذه الحالة كناقل مثالي (perfect conductor). أما عندما يزداد التردد إلى اللانهاية، تصبح مفاعلة الملف لا نهائية ويعمل الملف كمقاومة لا نهائية (عالية جداً جداً). إذا كان لديك ملف تحريضيته تساوي 20 mH وكان تردد الجهد المطبق عليه مساوياً 100 KHz فإن مفاعلة الملف ستكون:

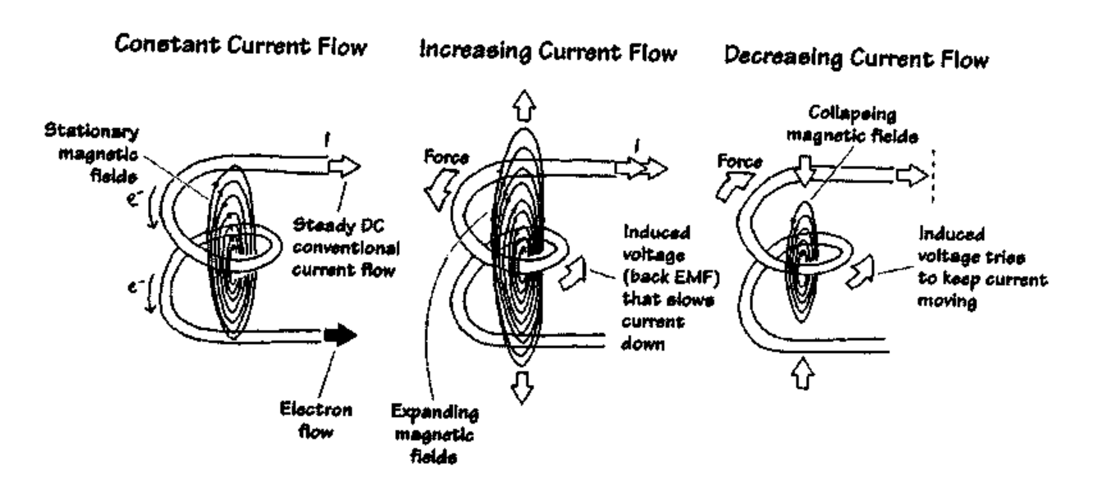
$$X_L = \omega L = 2\,\pi.f.L = (2\,\pi)\,(100 \times 10^3)\,(20 \times 10^{-3}) = 4000\,\pi\,\Omega$$

لاحظ أن (L) تؤثر على مفاعلة الملف وبزيادة (L) تزداد المفاعلة وطبعاً ينخفض التيار. يمكن استخدام الملف كعنصر حساس للتردد في الدارات العملية وذلك لأن مفاعلة الملف تتغيَّر بتغيُّر التردد، وعلى سبيل المثال يستخدم الملف في مقسمات الجهد الحساسة للتردد وفي دارات الحجب ودارات المرشحات (كما هي الحال في دارات مرسلات الترددات الراديوية ومستقبلاتها). تستخدم الملفات أيضاً في دارات الهزازات وفي المحولات وفي الحواكم حيث تعمل الملفات كمغانط كهربائية.

1.7.3 كيف يعمل الملف

يمكن فيزيائياً شرح آلية مقاومة الملف لتغيرات التيار من خلال الأشكال التالية.

نفرض أن تياراً ساكناً (dc) يمر في الملف اليساري من الشكل (60.3).



الشكل (60.3): مبدأ مقاومة الملف لتغيرات التيار.

في هذه الحالة تتحرك الإلكترونات كمجموعة بسرعة ثابتة وبنتيجة حركة الإلكترونات فإن فيضاً مغناطيسياً ثابتاً يحيط بالإلكترونات ويمكن إيجاد جهة الحقول المغناطيسيّة باستخدام قاعدة اليد اليسرى (left-hand rule).

وتقول قاعدة اليد اليسرى إنه إذا كان إبهام اليد باتجاه حركة الإلكترونات فإن جهة الأصابع الأربعة الباقية الملتفة هي جهة خطوط الحقل المغناطيسي.

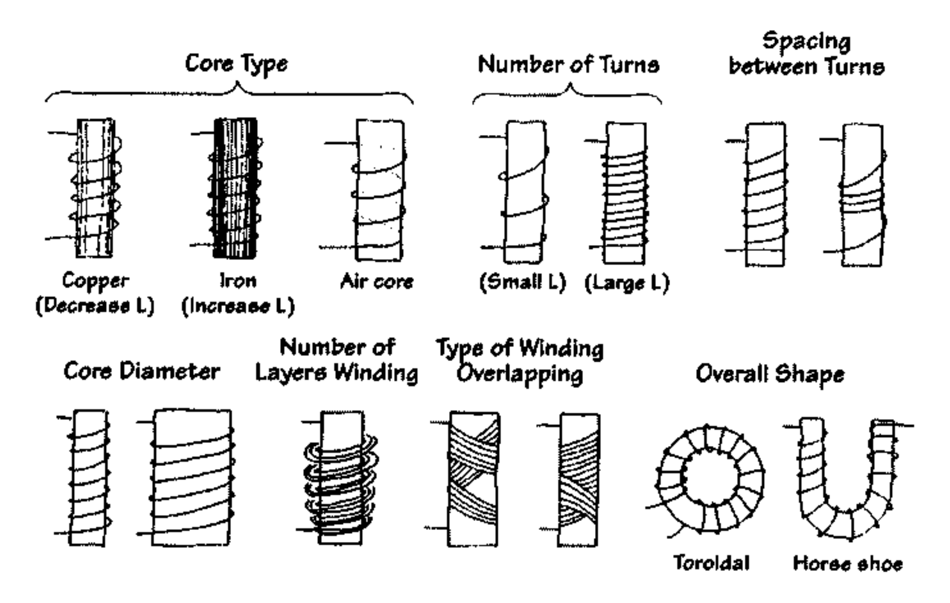
عند جمع خطوط الحقل المغناطيسي الناتجة عن حركة الإلكترونات في كل قطاع من الملف عمودياً نلاحظ أن الحقل يبدو وكأنه يصدر من مركز الملف كما هو واضح في الشكل (60.3). إذا بقيت سرعة الإلكترونات ثابتة فإن الحقل المغناطيسي المتمركز لا يتغيَّر. يمكن أن تمر خطوط الحقل المغناطيسي عبر عدة قطاعات من سلك الملف، ولكنها لا تؤثر على تدفق التيار عبر هذه القطاعات، ولكن إذا زاد التيار المتدفق فجأة فإن خطوط الحقل تتسع وتمتد كما في الشكل 60.3 — (الشكل الأوسط) ـــ وحسب قانون فاراداي في التحريض فإن هذا الحقل يُحرِّض (induce) قوة تؤثر على الإلكترونات في الملف وتطبق هذه القوة على الإلكترونات بحيث تؤدي إلى انخفاض سرعة تدفق الإلكترونات، وهذا يعني تخفيض التيار.

ينص قانون فاراداي (Faraday's law) على أن الحقل المغناطيسي المتغيِّر يحرض قوة مؤثرة على الجسيمات المشحونة).

إذا كان التيار المار في الملف ثابتاً ثم انخفض فجأة فإن الحقل المغناطيسي يؤدي إلى زيادة سرعة الإلكترونات وبالتالي زيادة التيار (مقاومة الانخفاض للتيار).

بالعودة إلى العلاقة $V = L.\frac{di}{dt}$ نلاحظ أن $\frac{di}{dt}$ تمثل تغيرات التيار مع الزمن، أما (V) فيمثل الجهد المتحرض على طرفي الملف ويعني أيضاً العمل المبذول على الإلكترونات لتخفيض تغيرات سرعتها. يسمى (V) أيضاً بأسماء عديدة منها الجهد المحرض ذاتياً (self induced voltage)، أو القوة المحركة الكهربائية المعاكسة (counter emf)، أو القوة المحركة الكهربائية العكسية (back emf). L في المعادلة هي تحريضيَّة الملف وهي ثابت التناسب بين الجهد المتحرض وتغيرات التيار بالنسبة للزمن.

تعبر (L) عن جودة الملف في مقاومة تغيرات التيار. تتعلق قيمة (L) بعدة عوامل عنها عدد لفات الملف (number of terms)، حجم الملف (coil size)، التباعد بين اللفات (Coil spacing)، توضع اللفات وترتيبها، نوع مادة نواة الملف، والشكل العام النهائي للملف (انظر الشكل 61.3).



الشكل (61.3): أشكال متنوعة من الملفات.

تُعطى تحريضية ملف وحيد الطبقة متراص اللفات بالعلاقة التالية:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

μ: قبولية المادة (permeability) التي يُلف حولها الملف. وهي للهواء تساوي $\mu = 4\pi \times 10^{-7}\ N/A^2$ حيث N عدد اللفات.

A: مساحة مقطع الملف.

N: عدد اللفات.

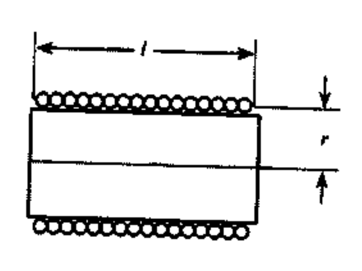
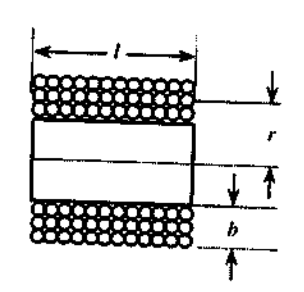
l: طول الملف.

يبيِّن الشكل التالي طرقاً تقريبيَّة لتحديد تحريضية ملف وحيد الطبقة متراص اللفات وآخر متعدد الطبقات متراص اللفات (الشكل 62.3). حيث تعطى L لملف وحيد الطبقة بالعلاقة:

$$L = \frac{(N \times r)^2}{gr + 10l}$$

وللملف متعدد الطبقات بالعلاقة:

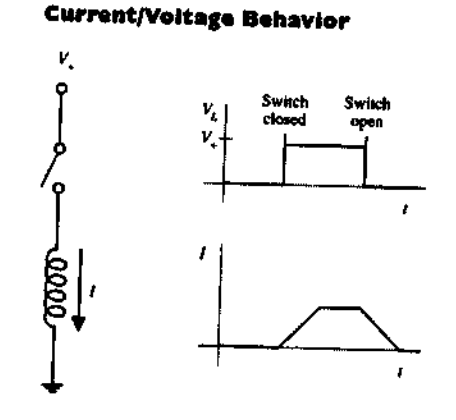
$$L = \frac{0.8\,(N \times 10l)}{6r + gl + 10b}$$

الشكل (62.3): طريقة حساب (L) لملف وحيد الطبقة ولآخر متعدد الطبقات.

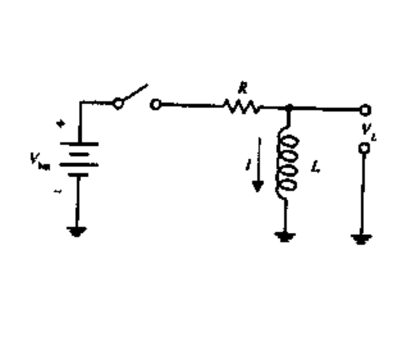
2.7.3 مبدأ العمل الأساسي للملف

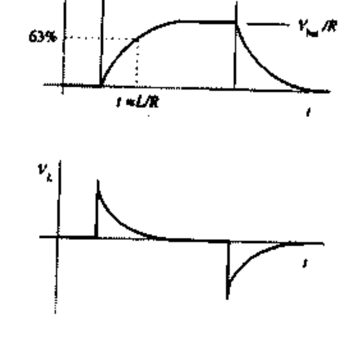
السلوك الجهدي التياري



إذا كان المفتاح الموجود في الشكل في حالة فتح (Open) لفترة من الزمن ثم أُغلق (on)، فإن الملف سوف يقاوم الجهد المطبق ويزداد التيار بميل يتعلق بتحريضية الملف، وعند الوصول إلى الحالة المستقرة فإن الملف يمرر تياراً يساوي الجهد المطبق مقسوماً على المقاومة الأومية للملف، وفي هذه الحالة (الحالة المستقرة) يكون سلوك الملف كسلك بمقاومة منخفضة. عند نقل المفتاح إلى حالة الفتح (open)، فإن الملف يقاوم مرة ثانية التغيُّر المفاجئ للتيار وينخفض التيار بميل سالب يتعلق بتحريضية الملف. يرتبط التيار بالجهد المطبق بعلاقة $\left(V = L\frac{di}{dt}\right)$.

سلوك دارة مقاومة/ملف





الشكل (63.3): دارات أساسية للملف.

عند إغلاق مفتاح دارة (RL) فإن الملف يعيق مرور التيار بسبب تحرُّض جهد بين طرفيه يعاكس الجهد الخارجي المطبق على الدارة وعند (t = L/R) يصل التيار إلى 63% من القيمة العظمى ومع مرور الزمن يصل التيار إلى الحالة المستقرة التي يعمل فيها الملف كسلك قليل المقاومة والتيار المار عبر الملف يعطى بالعلاقة $\left(\frac{V}{R}\right)$، R هنا هي المقاومة الموجودة في الدارة باعتبار مقاومة سلك الملف أصغر بكثير من (R). عند فتح المفتاح يجب من حيث المبدأ أن ينخفض التيار إلى الصفر ولكن الملف يقاوم التغيرات المفاجئة للتيار ويتحرض على طرفي الملف جهد يؤدي إلى استمرار تدفق التيار عبر الملف لفترة من الزمن، تُعطى في الشكل علاقة تيار الدارة بالزمن وعلاقة الجهد على طرفي الملف كتابع للزمن.

ترشيح الإشارة

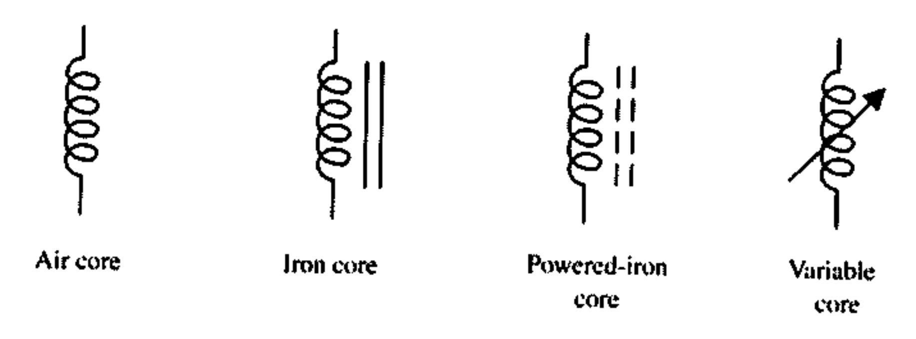
يُستخدم الملف كممانعة في طريق التيار المتناوب وتتعلق قيمة ممانعة الملف للتيار المتناوب بمفاعلة الملف التي تتعلق بالتردد وبتحريضية الملف (L)، أما بالنسبة للتيار المستمر، فإن الملف يشكل مقاومة أومية بسيطة. في الشكل السفلي نلاحظ أن الملف موصول بين الخرج والأرض لذلك سيكون جهد الخرج صفراً إذا كان جهد الدخل جهداً مستمراً ويزداد جهد الخرج بزيادة تردد إشارة الدخل. في الشكل الأخير من (63.3) وعند تطبيق جهد متناوب بين طرفي ملف فإن التيار المار في الملف سيكون متأخراً بالصفحة بمقدار (90°) عن الجهد المطبق فعندما يكون الجهد أعظمياً يكون التيار صفراً (والطاقة تخزن في الحقل المغناطيسي)، وعندما يصبح الجهد على طرفي الملف صفراً، فإن تيار الملف يصبح أعظمياً (تُطلق أو تحرَّر الطاقة من الحقل المغناطيسي).

Signal Filtering

الشكل (63.3): دارات أساسية للملف.

3.7.3 أنواع الملفات

إن قلب الملف يمكن أن يكون إما الهواء، أو الحديد أو بودرة الحديد، وتحريضية الملف ذو النواة الحديدية أكبر من تحريضية ملف بنفس عدد اللفات والطول والقطر ولكن نواته من الهواء. لبعض الملفات نواة (Core) متغيرة يمكن زلقها إما إلى داخل مركز الملف أو إلى خارجه. تتحدد تحريضية ملف بنواة فريتيَّة أو معدنية بمقدار دخول النواة ضمن الملف.



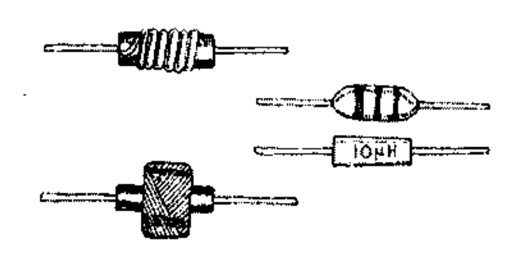
الشكل (64.3): رموز الملفات.

وفيما يلي بعض الأنواع الشائعة من الملفات التي تجدها في مراكز بيع القطع الإلكترونية.

الخوانق

الخوانق هي ملفات ذات استخدامات عامة وتعمل على الحد من تموجات التيار وتمرر التيارات المستمرة. تتوفر الخوانق بأشكال مختلفة وبتراتيب مختلفة لتوضع اللفات وبأنواع أغلفة مختلفة أيضاً، كما أن لها تحريضيات مختلفة وقيم تسامحات مختلفة. تتراوح القيم النموذجيَّة للخوانق بين (1 μH) و100 000 μH بتسامحات تتراوح بين (5) و(20%). يستخدم ترميز لوني لبعض أنواع الخوانق مشابه للترميز اللوني للمقاومات وذلك من أجل تحديد قيمة الخانق.

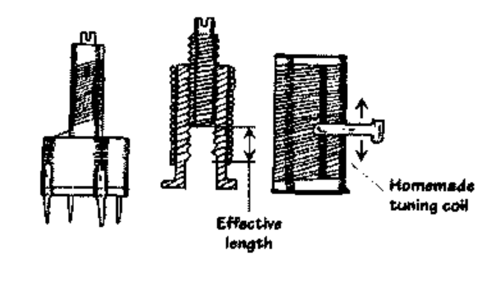
Chokes



ملفات التوليف

تحوي هذه الملفات عادة على نواة مزودة من طرفها العلوي بشق يشبه شق البرغي من أجل ضبط الملف على التحريضية المطلوبة. وتتوفر ملفات التوليف غالباً بسلسلة من الفرعات. تستخدم هذه الملفات عادة في المستقبلات الراديوية (radio receivers) من أجل اختيار التردد المطلوب (انظر موضوع الإلكترونات المستخدمة في الأجهزة اللاسلكية wireless electronics). يمكن تصنيع ملف توليف محلياً (ذاتياً) بلف سلك حول اسطوانة من البلاستيك ثم وصل زالقة أو مفرعة متزلقة على الملف كما في الشكل (65.3) كما هو واضح في الشكل. السلك المستخدم يمكن أن يكون سلكاً نحاسياً معزولاً بالورنيش، ومن أجل تأمين تماس بين الزالقة واللفات يمكن إزالة العازل عن اللفات على خط طولي في الملف بواسطة مبرد.

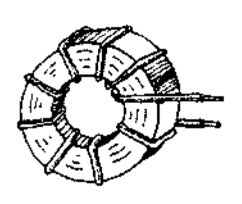
Tuning Coil



الملف الدائري

هذا الملف يشبه العزقة التي يلف حولها ملف، وتمتاز هذه الملفات بنسبة تحريضية إلى حجم عالية، كما تمتاز بعوامل جودة عالية (high quality factors). وهي ذات حجب ذاتي بالإضافة إلى أنها يمكن أن تستخدم في مجالات ترددات متطرفة الارتفاع (extremely high frequencies).

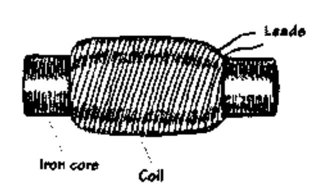
Toroidal Coil



ملف الهوائي

تستخدم نواة حديدية (iron core) في هذه الملفات لأن النواة الحديدة تكبر تأثيرات الحقل المغناطيسي، مما يجعلها حساسة جداً للتغيرات الطفيفة جداً للتيار. تستخدم هذه الملفات للتوليف على الإشارات الواقعة في مجال الترددات فوق العالية (ultra high frequency)، كالإشارات الراديوية.

Antenna Coil

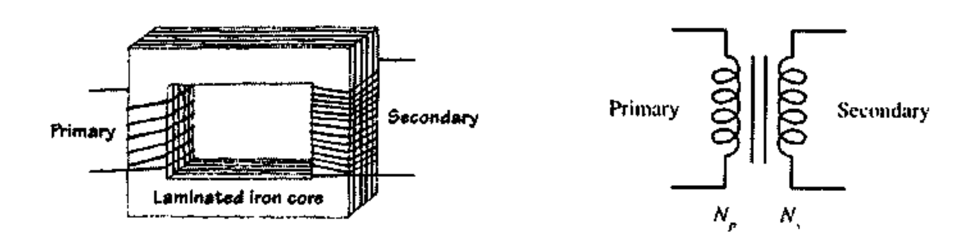


الشكل (65.3): نماذج لأنواع مختلفة من الملفات.

8.3 المحولات

المحول هو أداة ذات أربعة أطراف (four-terminal) والمحول قادر على تحويل الجهد المتناوب (ac) المطبق على دخله إلى جهد خرج متناوب أعلى (higher) أو أخفض (Lower) في طرف الخرج. لا تصمم المحولات لرفع الجهود المستمرة (dc) أو خفضها. يتكون المحول من ملفين أو أكثر يشتركان على نواة واحدة مكونة من صفائح الحديد، كما في الشكل (66.3).

يسمى أحد الملفات بالملف الابتدائي (Primary) وعدد لفاته (N_P) أما الملف الثاني فيسمى ثانوي (Secondary) وعدد لفاته N_S.



الشكل (66.3): شكل ورمز المحول.

عند تطبيق جهد متناوب (ac) على طرفي الملف الابتدائي يتولد فيض مغناطيسي:

$$\phi = \int \frac{V_{in}}{N_P} dt$$

من ملف الدخل وينتقل هذا الفيض المغناطيسي عبر النواة الحديدية ويمر عبر الملف الثانوي. تعمل النواة الحديدية على زيادة التحريضية أما الصفائح المكونة للنواة فسبب استخدامها هو تقليل ضياعات القدرة التي تنتج عن التيارات الإعصارية. ووفقاً لقانون فاراداي في التحريض فإن التدفق المغناطيسي المتغيِّر يحرِّض جهداً في الثانوي:

$$V_S = \frac{N_S d\phi}{dt}$$

ومن معادلة الفيض المغناطيسي المتولد في الأولي والجهد المتحرض على الثانوي يمكن الحصول على المعادلة التالية:

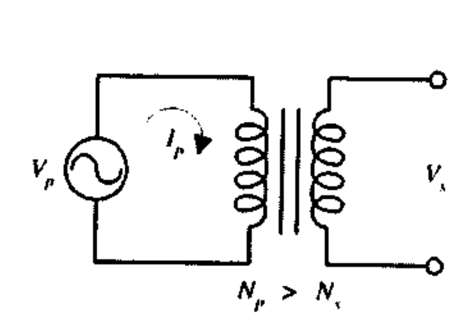
$$V_S = \frac{N_S}{N_P} V_P$$

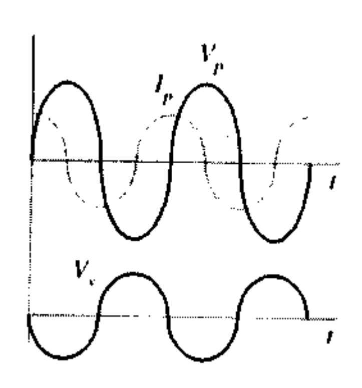
وهذه المعادلة تفيد بأنه إذا كان عدد لفات الثانوي أكبر من عدد لفات الابتدائي فإن جهد الثانوي سيكون أكبر من جهد الابتدائي، أما إذا كان عدد لفات الثانوي أقل من عدد لفات الابتدائي فإن جهد الثانوي سيكون أقل من جهد الابتدائي.

عند تطبيق جهد من منبع على الطرف الابتدائي لمحول طرفه الثانوي مفتوح (انظر الشكل 67.3) فإن المنبع يعتبر المحول كما لو أنه ملف ممانعته $Z_P = j\omega L_P$، L_P هي تحريضية الملف الابتدائي ويمر تيار في الطرف الابتدائي متأخراً عن الجهد بالصفحة بمقدار (90°). يمكن حساب تيار الابتدائي من تقسيم الجهد على الممانعة، أي (V_P/Z_P)، حسب قانون أوم. طبعاً ينشأ جهد على طرفي الثانوي:

$$V_S = \frac{N_S}{N_P} V_P$$

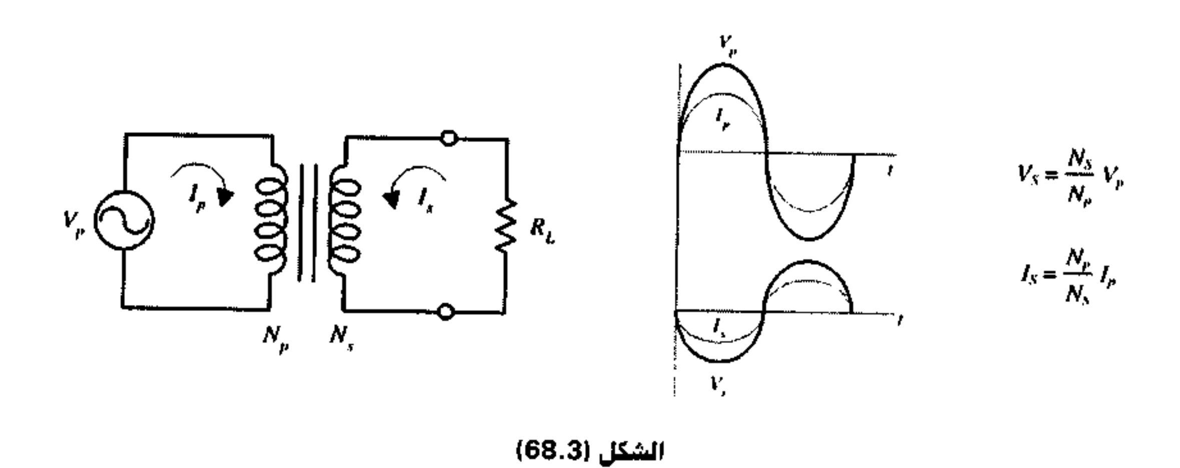
والجهد الناشئ على طرفي الثانوي مزاح بالصفحة بمقدار (180°) بالنسبة لجهد الابتدائي بسبب قطبية الجهد المتحرِّض.





الشكل (67.3): أشكال جهد وتيار الابتدائي وجهد الثانوي لمحول مفتوح الخرج.

ماذا يجري عند وصل حمل مع طرفي ثانوي المحول؟ طبعاً عند وصل حمل مع طرفي ثانوي المحول سوف يمر تيار في الحمل بسبب الجهد المتحرض على طرفي الثانوي بما أن الفيض المغناطيسي للطرف الأولي يُستخدم الآن لتحريض تيار في الحمل الموصول مع الثانوي (R_L) وبالتالي في ثانوي المحول، فإن تيار الابتدائي وجهد الابتدائي يتفقان بالصفحة، كما أن تيار الثانوي وجهد الثانوي يتوافقان أيضاً بالصفحة. يُرمز لتيار الابتدائي بالرمز (I_P) ولتيار الثانوي بالرمز (I_S)، ولكن جهد الثانوي يبقى معاكساً بالصفحة لجهد الابتدائي وطبعاً سيكون (I_S) معاكساً بالصفحة للتيار (I_P) والسبب في ذلك هو مرة ثانية فيزيائية الجهد المتحرض.



الشكل (68.3)

لإيجاد العلاقة بين تيار الثانوي وتيار الابتدائي نعتبر أن المحول ذو مردود مثالي يساوي (% 100). المردود في المحولات العملية يتراوح بين % 95 و% 99.

بعد ذلك نعتبر أن الاستطاعة المبدَّدة في الحمل تساوي الاستطاعة المقدمة إلى الطرف الابتدائي من المصدر (Source) الموصول مع الابتدائي. ومن معادلة الاستطاعة ($P = V^2/R$) ونسبة تحويل الجهد في المحول نجد أن الاستطاعة المبدَّدة على الحمل تُحسب من العلاقة التالية:

$$P = \frac{V_S^2}{R_L} = \left(\frac{N_S}{N_P}\right)^2 \cdot \frac{V_P^2}{R_L}$$

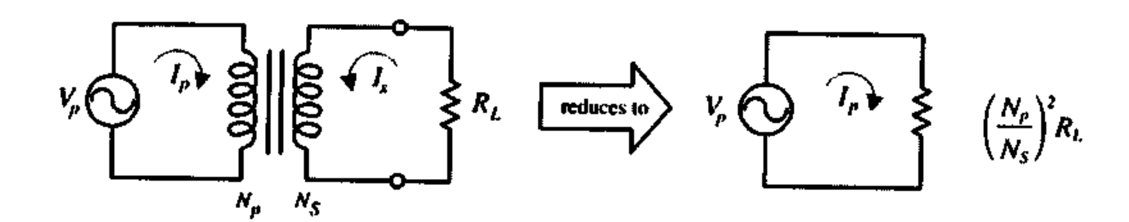
يحسب تيار الابتدائي I_P بدلالة الاستطاعة المقدمة إلى الابتدائي P_P التي تساوي الاستطاعة المقدمة إلى الحمل كما يلي:

$$I_P = \frac{P_P}{V_P} = \frac{P_R}{V_P} = \frac{N_S^2}{N_P^2}\frac{V_P^2}{R_L}.\frac{1}{V_P} \Rightarrow I_P = \left(\frac{N_S}{N_P}\right)^2.\frac{V_P}{R_L}$$

يمكن الآن وحسب قانون أوم إيجاد المقاومة التي يحس بها مصدر الجهد الموصول مع الطرف الابتدائي:

$$R_{eq} = \frac{V_P}{I_P} = \left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2 R_L$$

واعتماداً على هذه المعادلة يمكن اعتبار المحول كله وكأنه مقاومة R_{eq} موصولة مع مصدر جهد الطرف الابتدائي كما في الشكل (69.3).



الشكل (69.3): المقاومة المكافئة لمحوّل محمل في الثانوي بمقاومة (R_L).

يمكن استخدام معادلة R_{eq} إذا كان حمل ثانوي المحول ممانعة عقدية وفي هذه الحالة تستبدل R_L بممانعة (Z_L) و(R_{eq}) بممانعة مكافئة (Z_{eq}).

لإكمال موضوع العلاقة بين تيار الثانوي وتيار الابتدائي يمكن وبسهولة من توازن الاستطاعة أن نلاحظ أن:

$$P_R = P_P$$

$$I_S^2.R_L = I_P^2 R_{eq} \Rightarrow \left(\frac{I_S}{I_P}\right)^2 = \frac{R_{eq}}{R_L}$$

أو

$$\left(\frac{I_S}{I_P}\right)^2 = \frac{\left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2 R_L}{R_L} = \left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2$$

وبالتالي:

$$\frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} \Rightarrow I_S = \frac{N_P}{N_S}.I_P$$

تفيد هذه المعادلة في أنه إذا كان عدد لفات الثانوي أكبر من عدد لفات الابتدائي فإن تيار الثانوي سيكون أخفض من تيار الابتدائي (في هذه الحالة يكون جهد الثانوي أكبر من جهد الابتدائي). وبالعكس إذا كان عدد لفات الثانوي أقل من عدد لفات الابتدائي فإن تيار الثانوي سيكون أكبر من تيار الابتدائي (هنا يكون جهد الثانوي أصغر من جهد الابتدائي).

1.8.3 مبدأ العمل الأساسي للمحول

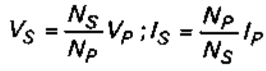
علاقات الجهد والتيار

Voltage/Current Relationships

$V_S = \frac{N_S}{N_P} V_P$

$I_S = \frac{N_P}{N_S} I_P$

يجب أن يكون عدد لفات الثانوي أكبر من عدد لفات الابتدائي كي يكون جهد الثانوي أكبر من جهد الابتدائي، وعندما يكون جهد الثانوي أكبر من جهد الابتدائي فإن تيار الثانوي يكون أقل من تيار الابتدائي. أما إذا أردت أن يكون جهد الثانوي أصغر من جهد الابتدائي فإن عدد لفات الثانوي يجب أن يكون أصغر من عدد لفات الابتدائي وفي هذه الحالة يكون تيار الثانوي أكبر من تيار الابتدائي، ومن كل ذلك تُلاحظ أن المحول الرافع للجهد خافض للتيار، أما المحول الخافض للجهد فهو رافع للتيار وعلاقات جهود وتيار الثانوي بجهود وتيار الابتدائي هي:



$$V_S = \frac{N_S}{N_P} V_P \, ; I_S = \frac{N_P}{N_S} I_P$$

محول خافض للجهد رافع للتيار

Step-Down Voltage/Step-Up Current

$V_S = \frac{100}{400}(120\ V) = 30\ V$

$I_S = \frac{400}{100}(1\ A) = 4\ A$

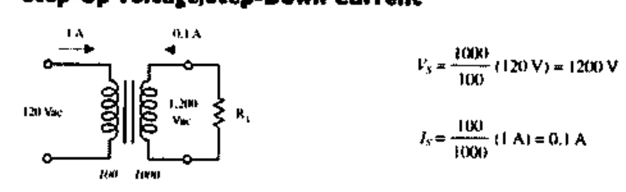
إذا كان عدد لفات الابتدائي في محول (400) لفة، وعدد لفات الثانوي (100) لفة، وكان جهد الدخل في طرف الابتدائي 120 V متناوب وتيار الابتدائي (1 A)، فإن جهد الثانوي سيكون (30 V) متناوب، أما تيار الثانوي فيكون (4 A). يُسمى المحول الذي يعطي جهد ثانوي أقل من جهد الابتدائي باسم محوِّل خافض للجهد (step-down transformer).

$$V_S = \frac{100}{400}(120) = 30V$$

$$I_S = (400/100)(1A) = 4A$$

محول رافع للجهد خافض للتيار

Step-Up Voltage/Step-Down Current



في المحول الرافع للجهد يكون جهد الثانوي أكبر من جهد الابتدائي، فإذا كان عدد لفات الأولي مثلاً (100) لفة وعدد لفات الثانوي (1000) لفة وكان جهد الابتدائي (120 V) متناوب وتيار الابتدائي (1 A)، فإن جهد الثانوي سيكون (1200 V) متناوب، أما تيار الثانوي فسيكون (0.1 A) وهذا المحول رافع للجهد (step-up transformer).

$$V_S = \frac{1000}{100}(120) = 1200V$$

$$I_S = \frac{100}{1000}(1A) = 0.1A$$

الشكل (70.3): محولات رافعة وخافضة للجهد والممانعة المكافئة للمحوّل.

تحليل دارة المحول

سنبيّن فيما يلي مثالاً عن كيفية التعامل مع المحولات في تحليل الدارات. وبفرض أن لديك دارة مركبة تتكون من عناصر أومية (resistive) وسعوية (Capacitive) وتحريضية (Inductive)، أي عناصر RLC، في طرفي ثانوي وابتدائي المحول.

يمكن تبسيط الدارات بإيجاد الممانعة المكافئة في الطرف الابتدائي للمحول، والممانعة المكافئة (equivalent impedance) هي الممانعة التي يُحس بها مصدر الإشارة الموصول مع الطرف الابتدائي للمحول ومعناها ومفهومها يتلخصان بأنها هي الممانعة التي إذا وصلت مع المصدر (Source) فإن تستهلك منه نفس التيار الذي كان يستهلكه المحول المحمَّل (Loaded transformer). ومما تعلمته سابقاً تجد أن الممانعة المكافئة (Z_{eq}) تُعطى بالعلاقة التالية:

$$Z_{eq} = Z_L\left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2$$

Circuit Analysis Problem

تابع الشكل (70.3): محولات رافعة وخافضة للجهد والممانعة المكافئة للمحوّل.

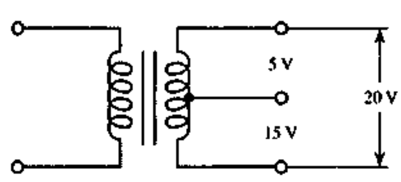
وبذلك يمكنك التعامل مع ممانعة Z_{eq} موصولة على التسلسل مع Z_P ومع منبع جهد. إذا رمزنا للممانعة المكافئة الكلية بالرمز (Z) حيث ($Z = Z_P + Z_{eq}$)، فإن التيار المستهلك من المنبع سيكون ($I = V/Z$)، وذلك طبعاً حسب قانون أوم.

2.8.3 أنواع خاصة من المحولات

محول ثانوي مفرّع

للمحولات ذات المفرع وصلة إضافية إما في طرف الابتدائي أو في طرف الثانوي وعند وجود المفرّعة في طرف الثانوي يمكن الحصول على ثلاثة جهود من طرف الثانوي كما في الشكل (71.3) في الأعلى حيث يمكن الحصول على الجهود (5 V)، (15 V) أو (20 V).





الشكل (71.3): أنواع المحولات الخاصة.

المحول متعدد الملفات

من المفيد أحياناً أن يكون للمحول عدد من الملفات المختلفة في الثانوي، كل واحد منها معزول كهربائياً عن الملفات الأخرى (وذلك بعكس الملف المفرَّع) والجهد الذي ينشأ على كل ملف يتناسب مع عدد لفاته. يمكن وصل ملفات الثانوي على التسلسل من أجل الحصول على جهد يساوي مجموع جهود الملفات، أما عند وصل هذه الملفات على التسلسل والتعاكس (series-opposing) فإن الجهد الناتج عليها هو الفرق بين جهودها. تدل النقاط الموجودة على الرسم على الأطراف المتوافقة بالصفحة.

Multiple-Winding Transformer

phase dot, 120 Vac, P, S_1, S_2, 20 Vac, 5 Vac

Series aiding — 25 Vac

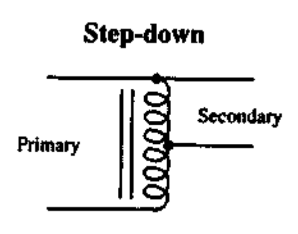
Series opposing — 15 Vac

المحول الذاتي

يوجد في هذا المحول ملف واحد وتفريعة ثابتة وبذلك يتكون الملف الأولي من طرف المفرَّعة وأحد أطراف الملف، أما الثانوي فيكون بين طرفي الملف أو بالعكس. يمكن استخدام المحول الذاتي كمحول رافع للجهد أو خافض للجهد، ولكن لا يمكن استخدامه في تطبيقات العزل (Isolation applications) لأن الأولي والثانوي من نفس الملف ولا يوجد عزل كهربائي بينهما. تستخدم المحولات الذاتية في تطبيقات توافق الممانعات.

Autotransformer

Step-up



المحول ذو الفرعة المتحركة (زالقة)

يحوي هذا المحول زالقة يمكن تحريكها إلى الأعلى والأسفل على ملف المحول، فإذا تم اعتبار الثانوي بين الزالقة والطرف السفلي للملف فإن تحريك الزالقة يؤدي إلى تغيير عدد لفات الثانوي وبالتالي الجهد المأخوذ منه.

Step-down

Secondary, Primary

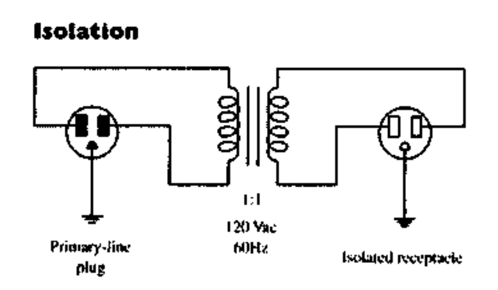
تابع الشكل (71.3): أنواع المحولات الخاصة.

3.8.3 تطبيقات

للمحولات ثلاثة تطبيقات أساسية هي العزل (أو الحماية بالعزل (isolation protection))، وتحويل الجهد (voltage conversion) وتوافق الممانعات. وسنتعرف الآن على بعض الأمثلة التي تبيِّن هذه التطبيقات.

العزل

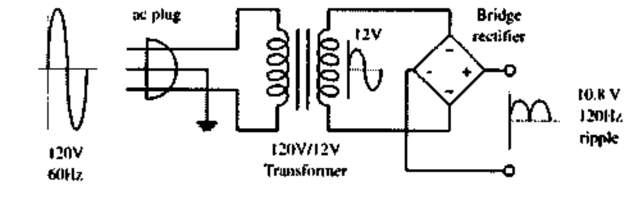
تستخدم محولات بنسبة تحويل واحد إلى واحد (1:1) لحماية دارات الثانوي من الصدمات الكهربائية (وكذلك لحماية الأشخاص الذين يلمسون عناصر من دارة الثانوي كالمفاتيح والمقابض والمسكات وغيرها). والسبب في تأمين الحماية هو أن الملف الثانوي يرتبط مغناطيسياً مع الابتدائي وليس كهربائياً، فلا يوجد ربط كهربائي فيزيائي مباشر مع خطوط الأولي ذات التيارات العالية جداً.



يجب استخدام الحماية العزلية (isolation protection) في كافة أجهزة الاختبار (test equipments)، وخاصة في التجهيزات العائمة (التي يُفصل فيها الأرضي) وذلك من أجل تجنب أخطار الصدمات الكهربائية. توجد ميزة أخرى للحماية العزلية وهي عدم مرور تيارات مستمرة بين العناصر والدارات الموصولة مع الثانوي والعناصر والتجهيزات الموصولة مع الطرف الابتدائي ويمكن وصل أجهزة التيار المتناوب (ac) مع الثانوي دون مرور تيار مستمر (dc) من الأولي إلى الثانوي. يبيِّن الشكل (72.3) في الأعلى مأخذاً للتيار المتناوب موصولاً إلى ثانوي محول، ويمكن استخدام هذا المأخذ لتغذية الأجهزة الكهربائية.

تحويل الطاقة

تعتبر المحولات من المكونات الأساسية لمصادر التغذية (Power Supply).

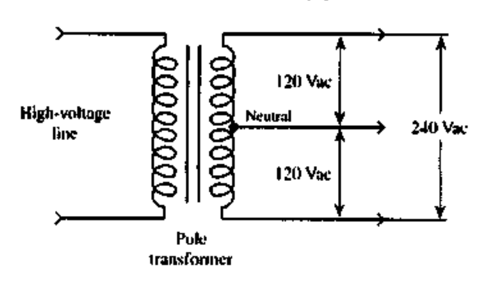


في الشكل نبيِّن محولاً خافضاً للجهد يقوم بتخفيض جهد شبكة المدينة (120 V) ذي التردد (60 Hz) إلى جهد (12 V) بتردد (60 Hz). يُستخدم جسر تقويم مكون من أربعة ديودات لتقويم الجهد المتناوب وتحويله إلى جهد وحيد الاتجاه (نبضي) بمطال يساوي (10.8 V) وتردد (120 Hz). يضيع جهد قدرة (1.2 V) تقريباً على الديودات، أما التردد فقد تضاعف لأن أنصاف الدور السالب لجهد ثانوي المحول تُقلب إلى الأعلى (تُعكس) فنحصل على موجات دورية ترددها (120 Hz).

تبلغ القيمة الوسطى لجهد الخرج حوالي (0.636) من القيمة العظمى للجهد المقوَّم.

استخدام المحول المفرّع

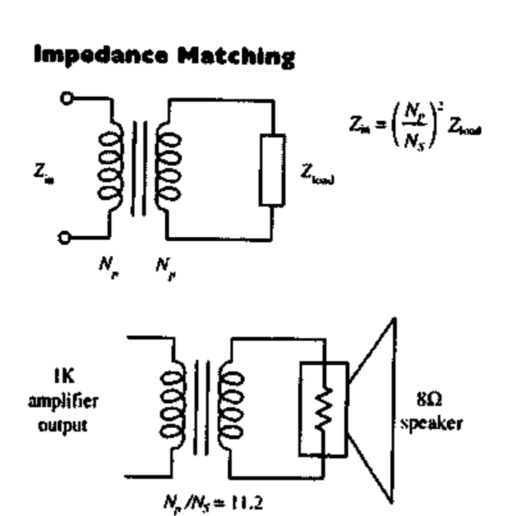
يتم نقل القدرة في الولايات المتحدة الأمريكية على خطوط بجهد يساوي (1000 V) وتستخدم محولات ذات فرعة في الثانوي لتخفيض هذا الجهد إلى (240 V)، ويمكن الحصول بين الفرعة وأي من طرفي الثانوي على جهد يساوي (120 V)، ويستخدم الجهد (120 V) لتغذية الأجهزة الكهربائية كأجهزة التلفزيون (TV) ومجففات الشعر وغيرها. أما الأجهزة الكهربائية الكبيرة كالثلاجات والمدافئ الكهربائية ومجففات الثياب فإنها تغذى من (240 V) كما تستخدم أيضاً لخط الحيادي (neutral line) وللمزيد من المعلومات عن توزيع الطاقة والتوصيلات الكهربائية المنزلية راجع الملحق (A) في نهاية هذا الكتاب.



الشكل (72.3): بعض تطبيقات المحولات.

تلاؤم الممانعة

ذكرنا سابقاً بأن أي جهاز موصول إلى ابتدائي محول يُحس بممانعة مكافئة للمحول تساوي $\left[\left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2 Z_{Load}\right]$، وذلك إذا كان الطرف الثانوي محملاً بالممانعة Z_{Load} وN_S هو عدد لفات الثانوي وN_P هو عدد لفات الابتدائي، ويمكن طبعاً وعن طريق الاختيار المناسب للنسبة (N_P/N_S) جعل الممانعة المكافئة تساوي ممانعة الجهاز على الرغم من أن ممانعة الحمل (Z_{Load}) لا تساوي ممانعة الجهاز. مثلاً إذا أردت استخدام محول لتحقيق توافق في الممانعة بين سماعة مقاومتها $(8\ \Omega)$ ومضخم موصول إلى الابتدائي ممانعته $(1\ K\Omega)$ عندها تعتبر أن $Z_{Load} = 8\ \Omega$ وZ_{in} تساوي $(1000\ \Omega)$ وتحل المعادلة بالنسبة لـ $\left(\frac{N_P}{N_S}\right)$ كما يلي:



تابع الشكل (72.3): بعض تطبيقات المحولات.

$$Z_{Load} = 8\Omega$$
$$Z_{in} = Z_{eq} = 1000\Omega$$
$$Z_{eq} = \left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2 Z_{Load} \Rightarrow 1000 = \left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2 \times 8 \Rightarrow$$
$$\left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2 = \frac{1000}{8} \Rightarrow \frac{N_P}{N_S} = 10\sqrt{\frac{10}{8}} = 11.2$$

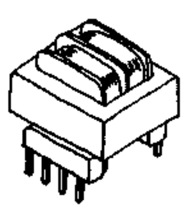
وهذا يعني أن عدد لفات الابتدائي يجب أن يكون أكبر بمقدار (11.2) مرة من عدد لفات الثانوي.

4.8.3 الأنواع الحقيقية من المحولات

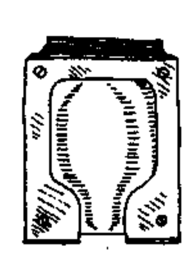
محولات العزل

تستخدم هذه المحولات بشكلٍ خاص لأغراض العزل ولذلك فإن جهد الخرج مساوٍ لجهد الدخل وهذه المحولات إذاً لا ترفع الجهد ولا تخفضه، ففي الولايات المتحدة الأمريكية يكون جهد خطوط الشبكة مساوياً (120 V) ويوصل هذه الجهد إلى الطرف الابتدائي للمحول فيكون جهد الثانوي مساوياً له وطبعاً له نفس التردد أي 60 Hz، ولكن الخرج يكون معزولاً كهربائياً عن الدخل. تتوفر هذه المحولات بحجب كهربائي ساكن بين الابتدائي والثانوي، كما أنها تكون مزودة بقوابس ومقابس ثلاثية الخطوط توصل مباشرة مع مأخذ التيار الكهربائي.

Power Conversion



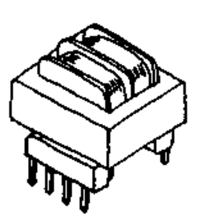
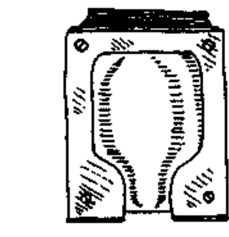




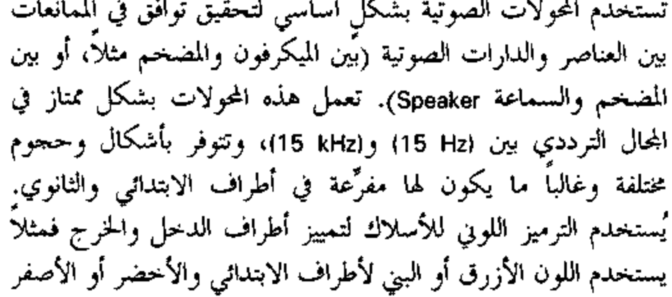
الشكل (73.3): بعض انواع المحولات الحقيقية (العملية).

محولات تحويل القدرة

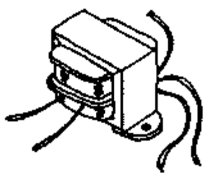
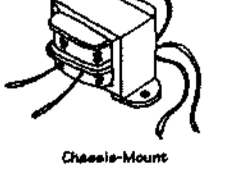
تستخدم هذه المحولات بشكلٍ أساسي لتخفيض الجُهد، وتتوفر بأنواع وأشكال وحجوم مختلفة وكذلك بنسب تحويل مختلفة. توجد أنواع من هذه المحولات ذات ثانوي مفرَّع وأنواع أخرى ذات ثانويات متعددة، ويستخدم الترميز اللوني للأسلاك لتمييز أسلاك الدخل (طرف الابتدائي) وأسلاك أطراف الثانوي (فمثلاً تكون الأسلاك السوداء لملف الابتدائي، والخضراء للثانوي والصفراء للطرف المفرَّع). تستخدم الأرجل الصلبة (Pins) في بعض أنواع المحولات لكلٍ من الابتدائي والثانوي والنقطة الوسطى (الفرعة) في الثانوي وذلكَ لتثبيت المحول مباشرة على الدارة المطبوعة PCB.

المحولات الصوتية

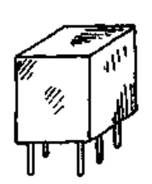
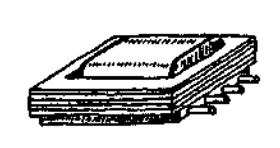


تستخدم المحولات الصوتية بشكلٍ أساسي لتحقيق توافق في الممانعات بين العناصر والدارات الصوتية (بين الميكرفون والمضخم مثلاً، أو بين المضخم والسماعة Speaker). تعمل هذه المحولات بشكل ممتاز في المجال الترددي بين (15 Hz) و(15 kHz)، وتتوفر بأشكال وحجوم مختلفة وغالباً ما يكون لها مفرَّعة في أطراف الابتدائي والثانوي. يُستخدم الترميز اللوني للأسلاك لتمييز أطراف الدخل والخرج فمثلاً يستخدم اللون الأزرق أو البني لأطراف الابتدائي والأخضر أو الأصفر لأطراف الثانوي، والأحمر والأسود للمفرَّعات في طرفي الثانوي والابتدائي على الترتيب. كما أن بعض هذه المحولات تكون مزودة بأرجل صلبة (قاسية) لوصلها مباشرة على اللوحة المطبوعة. توجد جداول خاصة تُعطى مع المحولات تُعطى فيها قيم مقاومات أطراف الابتدائي والثانوي وتساعد هذه الجداول على اختيار المحول المناسب في تطبيق ما.

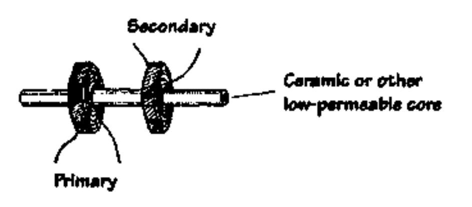

المحولات الصغيرة

تستخدم هذه المحولات بشكلٍ خاص لتأمين توافق الممانعة وهي دوماً ذات أرجل قاسية تصلحُ للتركيب مباشرة على بطاقة الدارة المطبوعة (PCB). تُعطى ممانعات ملف الابتدائي وملف الثانوي ونسبة عدد اللفات في جداول.

محولات التردد العالي

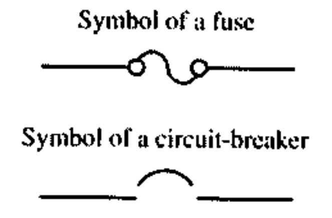
وهي محولات ذات قلب هوائي أو فريتي أو قلب مصنوع من بودرة الحديد (بدلاً من الصفائح التي تستخدم عادة في المحولات العاديّة)، وتستخدم في تطبيقات الترددات الراديوية (كأن تستخدم مثلاً لتأمين التوافق بين خط نقل وعناصر أو أجهزة أخرى. يُعتبر محول ــ خط النقل ــ عريض الحزمة أحد أهم الأنواع استخداماً من محولات الترددات العالية (انظر فقرة تلاؤم الممانعات).



تابع الشكل (73.3): بعض أنواع المحولات الحقيقية (العملية).

9.3 الفواصم (الفيوزات) وقواطع الدارات

الفواصم وقواطع الدارات هي عناصر أو أدوات تستخدم لحماية الدارات من التيارات الزائدة، التي تنتج عادة عن قفزات جهدية مفاجئة أو عن حدوث قصر (نتيجة عطل) في الدارات. يُصنع الفيوز (الفاصمة) من سلك دقيق من معدن خاص وينصهر هذا السلك عندما يزيدَ التيار المار عبره عن حدٍّ معيَّن ويقطع بذلك التغذية الكهربائية عن الدارة، وعند انصهار الفاصمة (الفيوز) يجب استبدالها بفاصمة لها نفس معدَّل التيار. أما قاطع الدارة فهو عبارة عن أداة تفصل التغذية عن الدارة عند تجاوز التيار المار عبرها حداً معيناً، ولكن يمكن إعادة فاصل الدارة إلى حالة العمل من جديد. يتكون فاصل الدارة من تماس موصول مع نابض وهذا التماس يكون متصلاً كهربائياً مع تماسٍ آخر. عندما يتجاوز التيار المار عبر القاطع حداً معيناً (وهو معدَّل التيار الخاص بالقاطع) فإن شريحة مكونة من معدنين تسخن (ترتفع درجة حرارتها) وتنحني فتحدث قطعاً حيث يتحرر الماسك (الذي يبقي التماسين في حالة تلامس) فيجذب النابض التماس الموصول معه وتُفصل الدارة. لإعادة القاطع إلى حالة العمل يكبس زر خاص أو يُحرَّك مقبض (مسكة) بحيث يُشد النابض وتوصل الماسكة لتمسك التماسين مع بعض.



الشكل (74.3): رموز الفاصمة وقاطع الدارة.

تستخدم الفواصم وقواطع الدارات في المنازل لحماية الأسلاك الكهربائية الموجودة داخل الجدران من الانصهار بتأثير التيارات الزائدة (حتى 15 A).

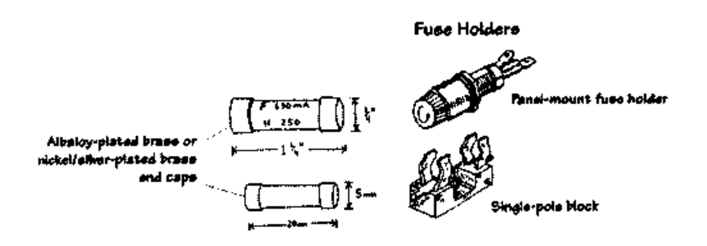
ولا تصمم قواطع الدارات لحماية الأجهزة التي تغذى من الجهد المتناوب كرواسم الإشارة ومصادر التغذية، فمثلاً إذا كان هناك عنصر هام في الدارة مستخدماً كعنصر تحديد للتيار وحصل قصر لهذا العنصر ونتيجة ذلك زاد التيار المار في الدارة من (0.1 A) إلى (10 A) عندها تزيد الاستطاعة المستهلكة في الجهاز حوالي (10000) مرة وذلك وفقاً للقانون ($P = I^2 R$) وتتعطل عناصر من الدارة ولكن القاطع الرئيسي (15 A) لا يفصل الدارة لأن التيار المستهلك (10 A) أقل من الحد الأعظمي الذي يفصل هذا القاطع عنده. فقفزة التيار في دارة ما قد تكون عالية ولكنها لا تكفي لتفعيل القاطع، ولذلك من الضروري أن توضع فاصمة خاصة بكل دارة.

للفواصم أنواع فمنها ما هو سريع الانصهار ومنها ما هو بطيء الانصهار فالفواصم سريعة الانصهار تفصل الدارة عند حدوث قفزات تيارية ولو لفترات قصيرة جداً، أما الفواصم بطيئة الانصهار فإنها تحتاج لزمن قد يصل إلى (ثانية) حتى تفصل الدارة وتستخدم عادة في الدارات التي تكون تيارات إقلاعها (لحظة انتقالها إلى حالة on) عالية. وكقاعدة عملية يجب أن يكون تيار الفيوز (الفاصمة) أكبر بـ (50 %) من تيار العمل الاسمي للدارة، وهذه الزيادة في معدَّل التيار ضرورية لتحمل التغيرات الطفيفة في التيار ولتعويض تغيُّر مواصفات الفاصمة، لأن معدَّل تيار الفاصمة ينخفض مع الزمن.
توصل الفواصم وقواطع الدارات على الخط الساخن (hot) في دارات التيار المتناوب وقبل الجهاز المطلوب حمايته، إذا وُصل القاطع أو الفاصمة إلى الخط البارد، فإن الجهد الكهربائي (120 V) مثلاً يبقى موصولاً مع الجهاز حتى لو انصهرت الفاصمة أو فَصل القطع آلياً. يوجد في قواطع الدارات التي تستخدم مع الجهود (240 V) ثلاث قواطع أو فواصم على كل الخطوط (الخطين الساخنين، والخط الحيادي كما في الشكل 75.3). سوف تدرس التوصيلات الكهربائية المترلية وموضوع توزيع القدرة بتفصيل أكبر في الملحق A.

الشكل (75.3)

1.9.3 أنواع الفيوزات وقواطع الدارات

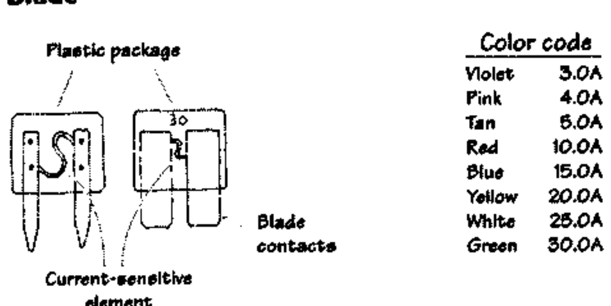
الفواصم الزجاجية والسيراميكية



يوضع السلك الحساس للتيار في هذه الفواصم ضمن كبسولة زجاجية أو سيراميكيَّة أسطوانية الشكل، وفي طرف الكبسولة يوجد غطاء معدني يستخدم كنقطة وصل للفاصمة، ويمكن أن تكون هذه الفواصم من النوع السريع أو البطيء. تستخدم هذه الفواصم في أجهزة القياس وفي الأجهزة والدارات الكهربائية، والأبعاد النموذجية للكبسولة الأسطوانية تكون عادة $\left(\frac{1}{4}\times1\frac{1}{4}in\right)$ أو (5 × 20 mm)، أما معدلات التيار فتتراوح بين (1/4) و(20 A) في حين تكون معدلات الجهود بين 32 V، 125 V و250 V.

الفيوزات السكينية

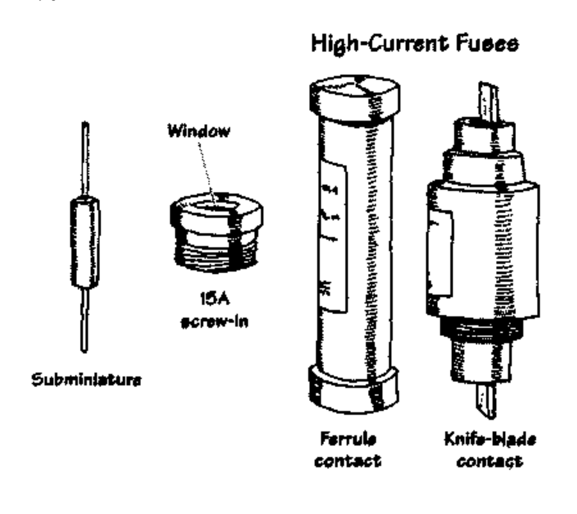
وهذه الفيوزات من النوع سريع الانصهار، وهي عادة ذات تماسات تشبه نصلات السكاكين وذلك لسهولة وضعها ونزعها في مآخذ خاصة بها ضمن الجهاز أو الدارة. تتراوح معدلات تيارات هذه الفيوزات بين (3 A) و(30 A) أما جهودها فتتراوح بين (32 V) و(36 V). يُستخدم الترميز اللوني لمعرفة تيارات وجهودها هذه الفواصم وهي شائعة الاستخدام في السيارات.



الشكل (76.3): بعض أنواع الفواصم.

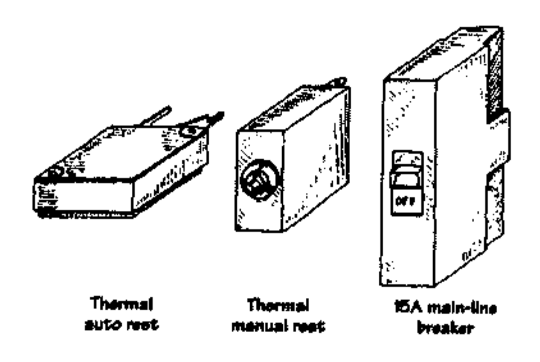
فواصم أخرى متنوعة

توجد أنواع أخرى من الفواصم كالفواصم المنمنمة والتي لها أطراف سلكية ويمكن أن توصل مباشرة على سطح الدارة المطبوعة وتستخدم في الأجهزة الصغيرة وفي غيرها من الدارات الإلكترونية وتتراوح معدلات تيارالها بين (0.05 A) و(10 A). وكذلك هناك فواصم على شكل الخرطوشة وهي إما أسطوانية الشكل وذات غطاء بين جانبين ناقلين يستخدمان كنقاط وصل أو ذات تماسات سكينية كما في الشكل (76.3) وتستخدم هذه الأنواع من الفواصم في علب التغذية الكهربائية الأساسية (240 V متناوب) وتصل معدلات تيارالها إلى (60 A) أو أكثر (في الفواصم سكينية الأطراف أكثر من 60 A). توجد فواصم لها شكل البرغي وتصل معدلات تيارالها حتى (15 A)، انظر الشكل (76.3).



قواطع الدارات

تتوفر قواطع للدارات مزودة إما بزر ضغط (Push button) أو بمقبض (rocker). لإعادة القاطع إلى حالة العمل. بعض هذه القواطع يدويَّة أي يجب إعادة تشغيلها يدوياً، أما بعضها الآخر فيعمل آلياً بواسطة آلية إعادة تشغيل حرارية فتعود هذه القواطع آلياً إلى حالة عمل عندما تنخفض درجة حرارتها. تكون معدلات التيار للقواطع الأساسية التي تستخدم في دارات التيار المتناوب بين (15 A) و(20 A)، أما القواطع التي تستخدم في الدارات الصغيرة فيمكن أن يصل معدَّل تيارها حتى (1 A)، انظر الشكل (76.3).



تابع الشكل (76.3): بعض أنواع الفواصم.

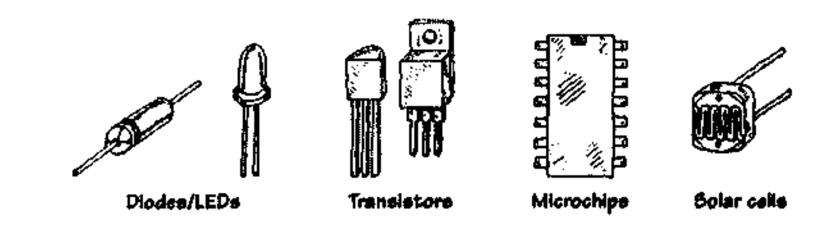
4



أنصاف النواقل

1.4 تكنولوجيا أنصاف النواقل

ربما تكون العناصر الإلكترونية المصنوعة من أنصاف النواقل هي أكثر العناصر الإلكترونية أهمية هذه الأيام. العناصر الإلكترونية كالديودات والترانزستورات والثايرستورات (Thyristors) والمقاومات الحرارية (thermistors) والخلايا الكهروضوئية (photovoltic cells) والمقاومات الضوئية (photoresistors) والعناصر الإلكترونية الليزرية والدارات المتكاملة (Integrated circuits)، كل هذه العناصر تُصنع من مواد نصف ناقلة أو بشكلٍ عام من أنصاف النواقل.

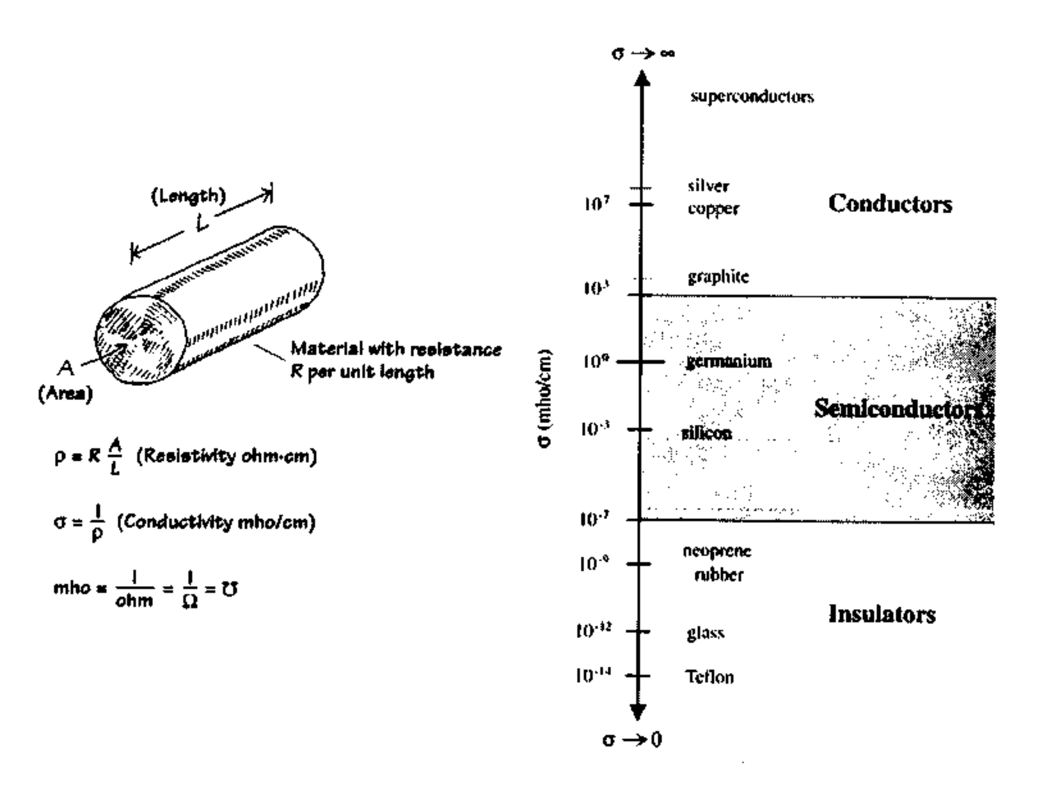


الشكل (1.4): أشكال بعض العناصر الإلكترونية المصنوعة من أنصاف النواقل.

1.1.4 ما هو نصف الناقل What is a Semiconductor

تُصنف المواد حسب ناقليتها للتيار الكهربائي إلى:

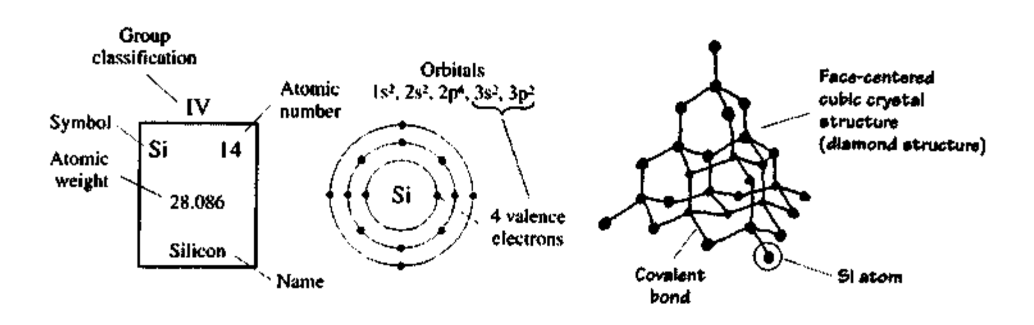
- مواد ناقلة تمرر التيار الكهربائي بسهولة كالفضة والنحاس وتسمى هذه المواد نواقل كهربائية (conductors).
- مواد لا تسمح برموز التيار الكهربائي كالمطاط، والزجاج، والتيفلون (Teflon)، وغيرها وهذه المواد تسمى عوازل (insulators).
- مواد نصف ناقلة وهي عبارة عن مواد لا تنقل التيار الكهربائي في درجة الصفر المطلق، أما في درجة حرارة الغرفة (20°C) فإنها تنقل التيار، وتعرَّف المواد نصف الناقلة بأنها مواد ذات ناقلية نوعية (σ) Conducting تقع في المجال من (10^{-7}) إلى (10^{3}) mho/cm والـــ mho وتُقرأ (مو) هي واحدة الناقلية، انظر الشكل (2.4)، بعض المواد نصف الناقلة تكون نقية (pure) مثل السيلكون (silicon) والجرمانيوم (germanium)، أما بعضها الآخر فهو عبارة عن خلائط كالنيكروم nichrome، كما أن بعضها سائلاً (Liquid).



الشكل (2.4): مجالات الناقلية للنواقل والعوازل وأنصاف النواقل.

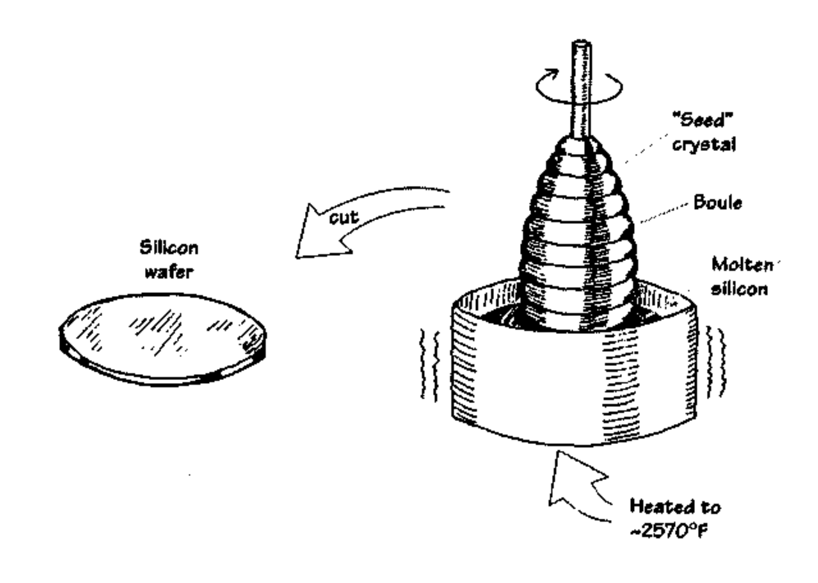
السيلكون

يعتبر السيلكون المادة نصف الناقلة الأكثر أهمية والتي تستخدم في تصنيع العناصر الإلكترونية. أما المواد الأخرى كالجرمانيوم والسيلينيوم (selenium) فإنها تستخدم أحياناً، إلا أنها أقل استخداماً من السيلكون. يمتاز السيلكون بأن له بنية ذرية (atomic structure) فريدة، وهذه البنية ذات ميزات مفيدة وهامة جداً لتصنيع العناصر الإلكترونية. يتوفر السيلكون بكثرة في الطبيعة فهو يقع في المرتبة الثانية بين أكثر العناصر توفراً في الطبيعة فمثلاً يُتوقع أن ميلاً مكعباً من ماء البحر يحتوي حوالي (15000) طن من السيلكون، ولكن هذا السيلكون نادراً ما يتوفر ببنيته الصافية النقية في الطبيعة، وقبل أن يكون من الممكن استخدامه لتصنيع العناصر الإلكترونية لا بد من فصله عن المواد المشيبة (الشوائب) العالقة به، وبعد تنقية السيلكون من الشوائب بطرق ومواد مختلفة فإن السيلكون يُصهر وتتشكل منه شرائح أو أقراص، حيث يتم تدوير السيلكون المنصهر في وعاء لتتشكل منه نواة كريستالية كبيرة (large crystal reed) وهذه النواة تُقطع إلى شرائح وأقراص.



الشكل (3.4): البنية البلورية للسيلكون ونموذج ذرته مع توزيع الإلكترونات في المدارات.

يبيِّن الشكل (4.4) ببساطة تكوين الشرائح السيلكونية بدءاً من مرحلة الصهر والتدوير وتكوين النواة الكريستالية والتقطيع النهائي.

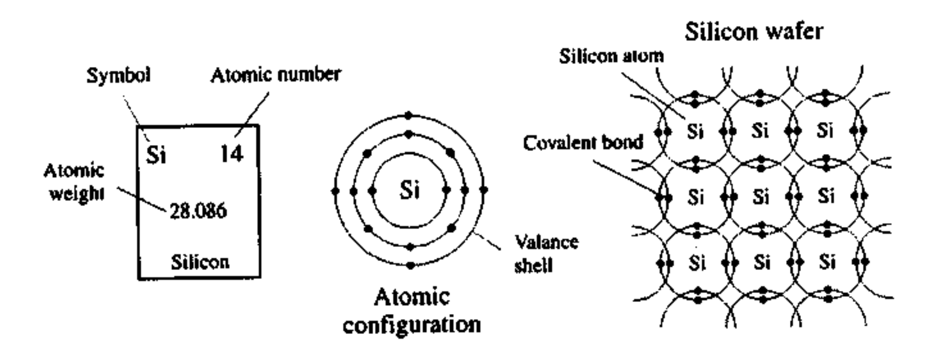


الشكل (4.4): خطوات تكوين الشرائح السيلكونية.

إن مصمم العناصر الإلكترونية لا يستخدم الشرائح السيلكونية النقيَّة بمفردها لتكوين العناصر الإلكترونية لأنها لا تتمتع بالمواصفات التي تؤهلها لهذا الاستخدام، وذلك لأن مصمم العناصر الإلكترونية يبحث غالباً عن مادة أو عن مواد تغيّر ناقليتها فتعمل كناقل في لحظة ما وكعازل في لحظة أخرى، وحتى تغيّر المادة من ناقليتها يجب أن تكون قادرة على الاستجابة لقوى خارجية مطبَّقة عليها، كجهد خارجي مثلاً، وشريحة السيلكون النقية لا تحقق ذلك. إن شرائح السيلكون النقية هي أقرب إلى العوازل منها إلى النواقل ولا تغيِّر ناقليتها عند تطبيق قوة خارجية عليها. يعرف كل مصمم للعناصر الإلكترونية هذه الأيام أن السيلكون تُضاف إليه مواد مشيبة خاصة بطرق تكنولوجية خاصة كي يصبح جاهزاً للاستخدام في تصنيع العناصر الإلكترونية، وتسمى عملية إضافة الشوائب الخاصة بعَملية الإشابه (doping).

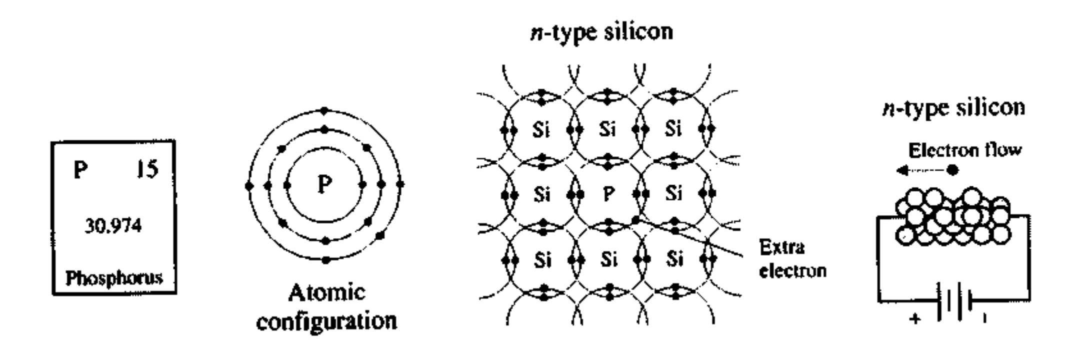
الإشابه Doping

إن عملية الإشابه هي باختصار إضافة شوائب إلى شريحة السيلكون بطريقة ما تجعل الشريحة مناسبة للاستخدام في تصنيع العناصر الإلكترونية، وتُستخدم مواد مختلفة للإشابه مثل الأنتيموان (antimony)، والأرسنيك (arsenic)، والألمنيوم (aluminum) والغاليوم (gallium). وتؤمن هذه المواد مواصفات خاصة للشريحة بعد أن تُضاف إليها فتستجيب الشريحة بصورة ما للجهود التي تطبق عليها وللإجهادات وللتغيرات الحرارية. هناك أيضاً مواد أساسية هامة تستخدم في إشابة السيلكّون مثل البورون (boron) والفوسفور (phosphorus). عند إشابة شريحة سيلكونية بالبورون أو الفوسفور فإن ناقليتها الكهربائية تتغير كثيراً. عادة لا تحوي البنية البللورية للسيلكون النقي على إلكترونات حرة (free electrons) وذلك لأن إلكترونات التكافؤ الأربعة الخارجية للذرة الواحدة تكون مرتبطة مع أربع ذرات مجاورة كما في الشكل (5.4) وعندما لا توجد إلكترونات حرة فإن تطبيق جهد كهربائي على شريحة السيلكون لن يؤدي إلى مرور تيار كهربائي عبرها (بسبب عدم وجود حوامل للشحنات حرة الحركة).



الشكل (5.4): البنية الذرية للسيلكون وشكل يوضح مخطط التركيب البللوري.

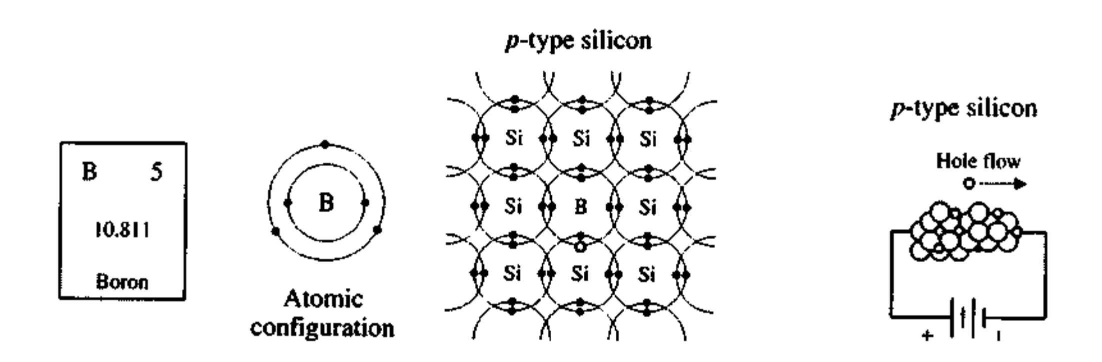
عند إضافة الفوسفور إلى شريحة السيلكون فإن ذرة الفوسفور الواحدة والتي تحوي خمسة إلكترونات في مدارها الخارجي سوف تتشارك بأربعة إلكترونات مع أربع ذرات سيلكون مجاورة وتشكل معها روابط مشتركة أما الإلكترون الخامس لذرة الفوسفور فإنه يبقى حراً ضمن النسيج البللوري للمادة ويمكن أن يشارك في عملية نقل التيار الكهربائي (انظر الشكل 6.4)، وعند تطبيق جهد كهربائي على شريحة السيلكون المشابة بالفوسفور فإن الإلكترون سوف ينتقل عبر الشريحة إلى القطب الموجب للجهد المطبق وطبعاً كلما زاد عدد ذرات الفوسفور ضمن شريحة السيلكون يزداد عدد الإلكترونات الحرة ويزداد التيار. يُسمى السيلكون المشاب بالفوسفور باسم سيلكون نوع (n) (n-type silicon) وحوامل التيار في هذا السيلكون هي الإلكترونات ذات الشحنات السالبة وتسميته بسيلكون نوع (n) مأخوذة من (negative-charge-carrier-type silicon).



الشكل (6.4): بنية سيلكون مشاب بالفوسفور وتكون الإلكترونات الحرة.

إذا أضيف البورون إلى السيلكون، فإن التأثير على الناقلية سوف يكون مختلفاً عن تأثير الفوسفور، وذلك لأن البورون يحوي في المدار الخارجي لذرته فقط على ثلاثة إلكترونات تكافؤ، ويشارك البورون بهذه الإلكترونات الثلاثة مع ثلاث ذرات مجاورة من السيلكون كما في الشكل (7.4) وكي يكتمل عدد الإلكترونات في المدار الخارجي لذرة البورون إلى (8) ثمانية إلكترونات فإن ذرة البورون تأخذ هذا الإلكترون من ذرة سيلكون مجاورة فيترك هذا الإلكترون مكانه فارغاً في ذرته أي تتولد رابطة غير مشبعة بين ذرتي سيلكون وتسمى هذه الرابط غير المشبعة باسم ثقب (hole) وهو موجب الشحنة (لأن الرابطة خسرت إلكتروناً سالب الشحنة). عند تطبيق جهد خارجي على شريحة سيلكون مشابه بالبورون، فإن الثقب سوف يتحركَ إلى القطب السالب للجهد المطبق، وينتقل إلكترون من رابطة مشتركة مجاورة ليملأ مكان الثقب. على الرغم من اعتبار الثقب ذا شحنة موجبة إلا أن الثقب لا يحوي شحنة فيزيائية وفقط يظهر كما لو أن الثقب له شحنة موجبة وذلك بسبب عدم توازن الشحنات في الذرة التي خسرت إلكتروناً وخلف وراءه ثقباً فعادة تكون شحنات الإلكترونات التي تدور حول نواة ذرة سالبة ومساوية لشحنات البروتونات (protons) الموجبة الموجودة في نواة

الذرة وعندما تخسر الذرة إلكتروناً تصبح شحنتها الكلية موجبة، بمقدار شحنة بروتون موجب واحد، أو إلكترون سالب (negative electron). يسمى السيلكون المشاب بالبورون باسم سيلكون نوع (p) أو (p-Type silicon) ومعنى ذلك أن حوامل الشحنة المتحركة هي الثقوب ذات الشحنات الموجبة (positive-charge-carrier-type silicon).



الشكل (7.4): بنية سيلكون مشاب بالبورون وتكوّن الثقوب الحرة.

ومما سبق تُلاحظ أن كلاً من السيلكون نوع (n) والسيلكون نوع (p) قادرٌ على تمرير التيار الكهربائي والسيلكون نوع (n) يمرر التيار الكهربائي بواسطة الإلكترونات الحرة، أما السيلكون نوع (p) فيمرر التيار بواسطة الثقوب الحرة.

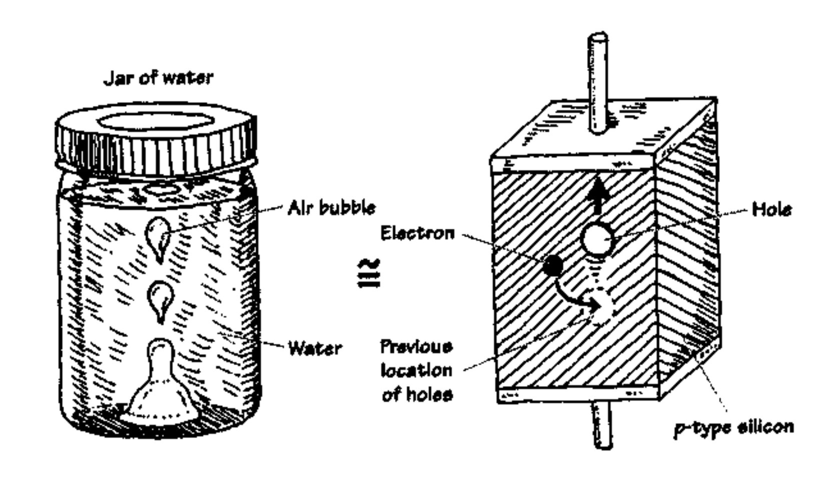
ملاحظة للتوضيح

تحوي ذرة البورون على ثلاثة إلكترونات تكافؤ، أما ذرة السيلكون فتحوي في مدارها الخارجي على أربعة إلكترونات تكافؤ. وهذا يعني أن البنية الشبكية للسيلكون المشاب بالبورون تحوي إلكترونات حرة أقل من الثقوب، ولكن هذا لا يعني على الإطلاق بأن السيلكون من النوع (p) ذو شحنة كلية موجبة، وذلك لأن الإلكترون الذي فقدته إحدى الروابط المشتركة لذرات السيلكون والذي تأخذه ذرة بورون ليجعل عدد إلكتروناتها السطحية مساوياً ثمانية، هذا الإلكترون يجعل شحنة ذرة البورون سالبة، وهذه الشحنة السالبة تقابل وتساوي الشحنة الموجبة لبروتون النواة التي فقدت ذرتها ذات الإلكترون، أي أن الشحنة الكلية لمادة نصف ناقلة نوع (p) تكون معتدلة، وكذلك الشحنة الكلية بالنسبة لمادة نصف ناقلة نوع (n).

ملاحظة أخرى للتوضيح (حوامل الشحنات)

ماذا نعني عندما نقول إن ثقباً يتحرك؟ وقد ذكرنا أعلاه أن الثقب هو لا شيء، أليس هذا صحيحاً. كيف يمكن إذن أن يتحرك هذا اللا شيء؟ قد يبدو هذا بأنه تعارض في صحة الفكرة، ولكن عندما يقال لك أو تقرأ أو تسمع بأن ثقباً يتحرك أو أن حوامل الشحنات الموجبة في سيلكون نوع (p) تتحرك، فإن الإلكترونات في الحقيقة هي التي تتحرك والسؤال الذي يتبادر إلى الذهن هو: أليست حركة الإلكترونات هنا مثل حركة الإلكترونات في مادة سيلكون نوع (n)؟ والجواب هو بالطبع لا. تخيل أن لديك قارورة مغلقة فيها ماء وأن فيها فقاعة هواء وأن القارورة محكمة الإغلاق، إذا قلبت القارورة بحيث يصبح طرف السدادة من الأسفل ثم أعدتها إلى وضعها السابق تلاحظ أن فقاعة الهواء تتحرك بعكس اتجاه حركة الماء عند تحريك القارورة وكي تتحرك فقاعة الهواء يجب أن يبتعد الماء عن طريقها. في هذه المقارنة يعتبر الماء مشابهاً للإلكترونات في مادة نصف ناقلة نوع (p) أما الثقوب فتشابه فقاعات الماء. عندما يُطبق جهد على طرفي مادة نصف ناقلة نوع (p)، فإن الإلكترونات المحيطة بذرة البورون تُجبر على التحرك باتجاه القطب الموجب للجهد المطبق، أما الثقب القريب من ذرة البورون فإنه يبدو وكأنه يتحرك باتجاه القطب السالب للجهد المطبق، وهذا الثقب في الواقع ينتظر قدوم

إلكترون من ذرة مجاورة كي يملأ مكان الثقب وهذا الإلكترون القادم من ذرة مجاورة يترك مكانه ثقباً وهكذا يبدو أن الثقوب تتحرك بعكس اتجاه حركة الإلكترونات فالإلكترونات تتحرك باتجاه موجب الجهد الخارجي أما الثقوب فيكون اتجاه حركتها باتجاه القطب السالب للجهد الخارجي.



الشكل (8.4): مقارنة بين حركة الثقوب في مادة (p) وحركة فقاعات الماء في وعاء.

ملاحظة / خبرة

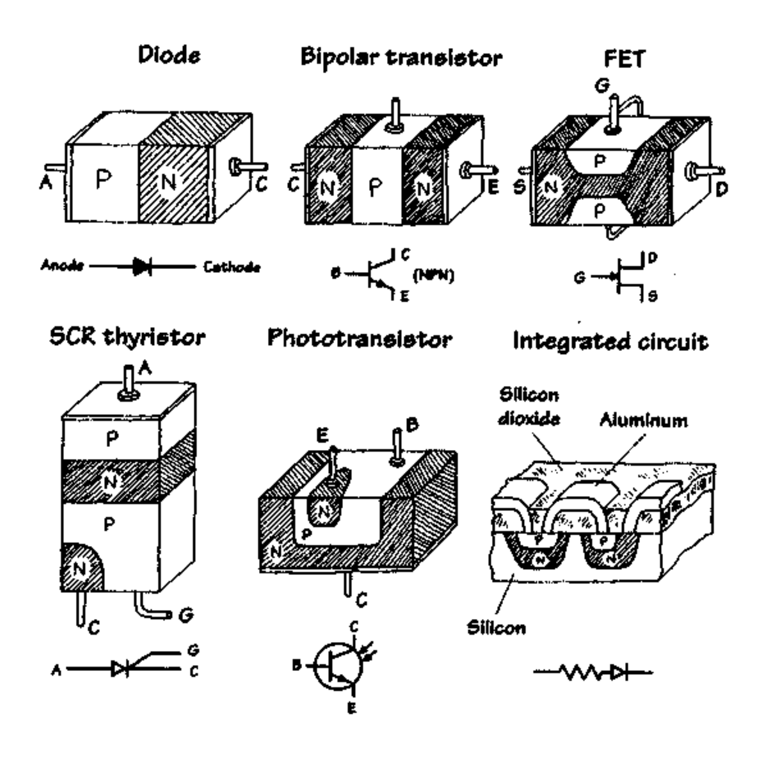
لماذا نسمي الثقوب بحوامل للشحنات الموجبة؟ كيف يستطيع اللا شيء أن يحمل شحنة موجبة؟ عندما يتحرك الثقب عبر بللورة المادة المكونة من ذرات السيلكون التي يزيد عددها عن عدد ذرات المادة المشيبة، فإن حركة الثقب تسبب تغيراً طفيفاً في شدة الحقل الكهربائي حول ذرة السيلكون في البللورة، وعندما يتحرك إلكترون ليملأ مكان الثقب السابق فإنه يَخلق مكانه ثقباً جديداً وتخسر ذرة السيلكون التي تحرر منها هذا الإلكترون شحنة سالبة تساوي شحنة الإلكترون الذي خسرته وتبقى شحنتها موجبة (لأن أحد بروتونات نواتها يبقى بشحنته الموجبة زائداً عن البروتونات الأخرى ذات الشحنة الموجبة والتي تتوازن شحناتها مع شحنات الإلكترونات الموجودة في الذرة)، وتعبير أو اصطلاح حوامل الشحنات الموجبة يعود في الأصل إلى الشحنة الموجبة لنواة الذرة التي فقدت إلكترون.

2.1.4 تطبيقات السيلكون

قد تتساءل لماذا هذه الأنواع الجديدة من السيلكون؟ سيلكون نوع (n) وسيلكون نوع (p)، وما فائدة هذه الأنواع الجديدة في تصنيع العناصر الإلكترونية؟ ولماذا كل هذا الحديث عن هذه الأنواع الجديدة؟

إن البللورات السيلكونية الجديدة المشابة هي نواقل وبالتالي فإن لدينا نوعين من النواقل، الأول وهو السيلكون نوع (n) يحقق الناقلية من خلال حركة الإلكترونات والثاني وهو النوع (p) يحقق الناقلية من خلال حركة الثقوب، وهذا الشيء هام جداً، لأن أسلوب نقل التيار الكهربائي في السيلكون نوع (n) والسيلكون نوع (p) هام جداً في تصميم العناصر الإلكترونية كالديودات، والترانزستورات والخلايا الشمسية (solar cells). حَدَّد المختصون بتصنيع العناصر الإلكترونية طرقاً لالتحام شرائح سيلكونية نوع (n) مع أخرى نوع (p) بحيث يتم الحصول على عناصر ذات مواصفات خاصة ومحددة جداً عند تطبيق جهد خارجي على هذه العناصر، وهذه المواصفات الخاصة تتحقق من خلال التفاعل المتبادل بين حركة الثقوب والإلكترونات بين المواد نصف الناقلة نوع (n) ونوع (p). وبواسطة هذه المواد (المادة n والمادة p) بدأ مصممو العناصر الإلكترونية ببناء عناصر تمرر التيار باتجاه واحد، وتسمح هذه العناصر بإغلاق أو فتح مسار التيار باستخدام الجهد

كوسيلة تحكم. لقد وجد (Folks) أن وضع مادة نوع (n) بجوار مادة نوع (p) بحيث يتشكل التصاق بينهما وأن تطبيق جهد معيَّن بين الطرفين (أحد أقطاب الجهد على المادة p والقطب الآخر على المادة n) يؤديان إلى إصدار ضوء (light) أو فوتونات عندما يقفز الإلكترون عبر المتصل (junction) أو الوصلة بين المادة (p) والمادة (n) وقد لوحظ أن هذه الظاهرة عكسية، أي عند تسليط ضوء على المتصل فإن الإلكترونات تتدفق من مادة إلى الأخرى أي يمر تيار عبر العُنصر المتشكل من التحام مادة (p) مع مادة (n). وقد تم بناء عدد كبير من العناصر الإلكترونية من المواد (p) و(n) وسوف نتعرف في الفصول التالية من هذا الكتاب على العناصر الإلكترونية الأساسية المصنوعة من أنصاف النواقل والتي شاع استخدامها في بناء الأجهزة والدارات الإلكترونية.



الشكل (9.4): أشكال توضح بنى وتراكيب ورموز بعض العناصر الإلكترونية.

2.4 الديودات Diodes

الديود هو عنصر الكتروني يمرر التيار الكهربائي باتجاه واحد، وعندما يكون جهد مصعد (anode) الديود أكثر إيجابية من مهبطه (cathode)، فإن التيار يمر عبر الديود من المصعد إلى المهبط ويُسمى هذا النوع من استقطاب الديود بالاستقطاب الأمامي (forward biasing)، أما عندما يكون جهد مصعد الديود أقل إيجابية من جهد المهبط، فإن الديود لا يمرر التيار الكهربائي ويسمى هذا النوع من الاستقطاب بالاستقطاب العكسي (reversed biasing). يبيِّن الشكل (10.4) رمز الديود وتسمية أطرافه (leads).



الشكل (10.4): الرمز الكهربائي للديود وتسميات أطرافه.

تستخدم الديودات عادة في دارات تحويل الجهود أو التيارات المتناوبة (ac) إلى جهود أو تيارات مستمر (dc)، كما هي الحال في مصادر التغذية (ac/dc power supply). كذلك تستخدم الديودات في دارات ضاربات الجهد (voltage-multiplier circuits)، وفي دارات تحديد الجهود (voltage-limiting circuits)، وكذلك في دارات تنظيم الجهد (voltage-regulator circuits).

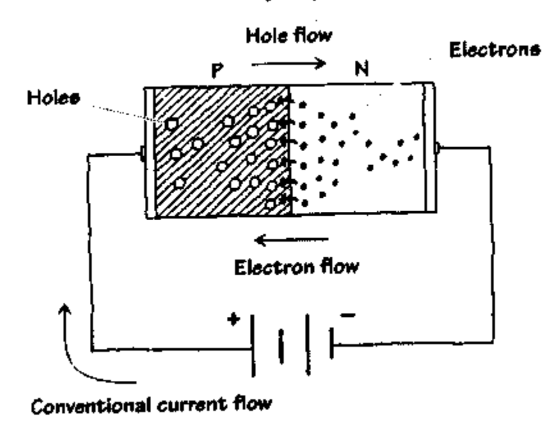
1.2.4 مبدأ عمل ديودات المتصل p-n

يتم تشكيل ديود المتصل p-n أو الديود المقوِّم (rectifier diode) من مادة (p) ومادة (n) بطريقة تكنولوجية خاصة والبنية التوضيحية للديود المبينة في الشكل (9.4) ما هي إلا شكل بسيط لتوضيح مكونات الديود وفي الواقع يتم تصنيع الديود من شريحة سيلكونية نوع (n) يُغطى سطحُها بمادة عازلة ثم تحفر مناطق في العازل بطريقة ضوئية ويتم تبخير مادة خاصة وترسيبها فوق الحفر في السطح المعزول فتتحول هذه المناطق من مناطق (n) إلى مناطق (p) وبذلك يتم تشكيل آلاف الديودات دفعة واحدة وبعد ذلك تُقطّع هذه الديودات وتوصل أطرافها الخارجية وتوضع ضمن أغلفة بلاستيكية أو سيراميكية، يسمى الطرف (n) للديود باسم المهبط (cathode) أما الطرف (p) فيسمى المصعد (anode).

وتعتمد فكرة تمرير التيار عبر هذا العنصر المكون من مادة (p) وأخرى نوع (n) فقط في اتجاه واحد على التأثير أو التفاعل المتبادل بين حوامل الشحنات في المادة (p) وحوامل الشحنات في المادة (n) بطريقة ما تؤمن مرور التيار عند تطبيق جهد بقطبيّة معينة على طرفي العنصر وعدم تمرير التيار عند عكس القطبيّة. إن المادة (n) تنقل التيار بواسطة الإلكترونات، أما المادة (p) فإنها تنقل التيار بواسطة الثقوب، والميزة الهامة التي تجعل الديود يمرر باتجاه واحد هي طريقة التأثير والتفاعل المتبادل بين حوامل الشحنات فيما بينها وبين حوامل الشحنات والجهد الخارجي المطبق ونبيِّن فيما يلي شرحاً يوضح هذا التفاعل والتأثير المتبادل بين حوامل الشحنات وبين الحقل الكهربائي الخارجي المطبق (external electrical field).

الاستقطاب الامامي (الباب مفتوح)

عند وصل ديود إلى بطارية كما في الشكل (11.4) بحيث يكون القطب الموجب للبطارية موصولاً مع الطرف (p) والقطب السالب موصولاً مع الطرف (n)، فإن الإلكترونات في المنطقة (n) تتوجه إلى موجب البطارية والثقوب في المنطقة (p) تتوجه إلى سالب البطارية فتلتقي الثقوب والإلكترونات في منطقة المتصلِ (المركز) وعند التقاء إلكترون مع ثقب فإنه يعدِّله كهربائياً ويحدث اختفاء للثقب ويصبح الإلكترون الذي ملأ الثقب مرتبطاً بالذرة ولا يشارك في التيار الكلي المار عبر الديود ولكن لا يحدث ذلك لكل الإلكترونات ولكل الثقوب وبذلك يتشكل تيار عبر الديود من الإلكترونات التي تصل موجب البطارية ومن الثقوب التي تصل سالب البطارية.

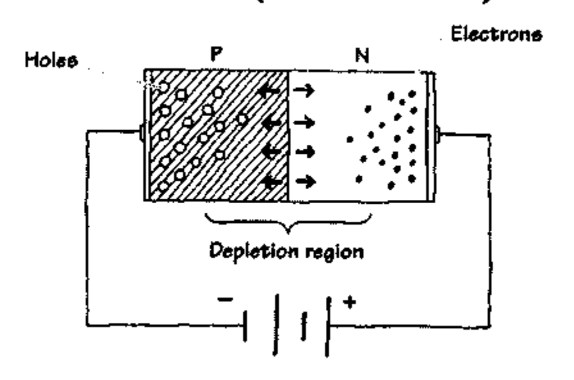


الشكل (11.4): الاستقطاب الامامي لديود p-n.

تنتج هذه الحركة لحوامل الشحنات بتأثير الحقل الكهربائي الخارجي الناتج عن البطارية. إن طريقة توصيل أقطاب البطارية مع أطراف الديود بهذا الشكل (+ موجب على p و- سالب على n) تسمى طريقة الاستقطاب الأمامي.

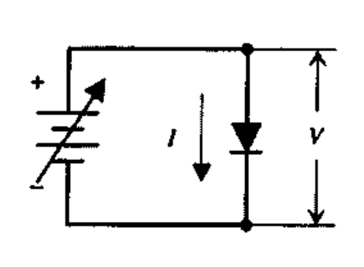
الاستقطاب العكسي (الباب مغلق)

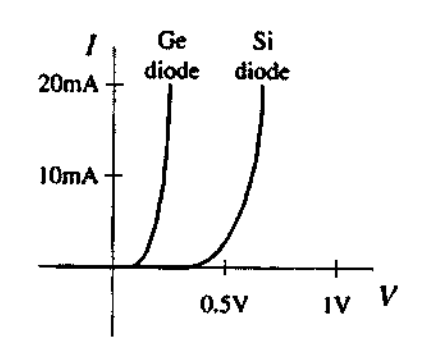
عند وصل سالب البطارية مع الطرف (p) وموجب البطارية مع الطرف (n) فإن إلكترونات الطرف (n) تجبر على التحرك إلى موجب البطارية وثقوب الطرف (p) تتحرك إلى سالب البطارية وتصبح المنطقة المحيطة بمكان التحام (p) مع (n) والتي تسمى منطقة المتصل خالية من حوامل الشحنات القابلة للحركة، وتسمى هذه المنطقة باسم منطقة مجرّدة (depletion region) وبما أنها خالية من حوامل الشحنات القابلة للحركة فإنها عازلة وتمنع التيار من المرور عبر الديود. ويسمى هذا النوع من الاستقطاب باسم الاستقطاب العكسي.



تابع الشكل (11.4): الاستقطاب العكسي لديود p-n.

لا تتحقق ميزة تمرير التيار في اتجاه واحد في الديود عندما يكون استقطابه أمامياً إلا إذا كان جهد البطارية الموصولة مع الديود أكبر من قيمة معينة وهذه القيمة تساوي تقريباً (0.6V) في ديودات السيلكون. إذا كان جهد البطارية الموصولة مع الديود أصغر من هذه القيمة فإن الديود لن يمرر حتى لو كان استقطابه أمامياً، تسمى هذه القيمة للجهد باسم جهد عتبة التمرير وقد يبدو للوهلة الأولى أن جهد عتبة التمرير هو إحدى سلبيات الديود، إلا أن هذا الجهد يصبح مفيداً جداً في التطبيقات حيث يعمل الديود كمفتاح حساس للجهد (voltage-sensitive switch). تحتاج ديودات الجرمانيوم إلى جهد أصغري قدره (0.2V) كي تمرر التيار إذا كان استقطابها أمامياً، أي أن جهد العتبة فيها يساوي (0.2V). يبيّن الشكل (12.4) العلاقة بين التيار والجهد في ديودات السيلكون والجرمانيوم.



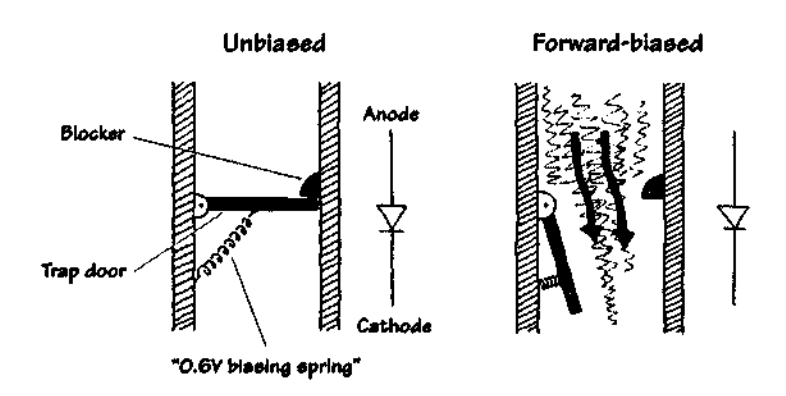


الشكل (12.4): مميّزة الفولت-أمبير لديودات (Si) و(Ge) ومخطط دارة استقطاب أمامي.

هناك فرق آخر بين ديودات السيلكون (Si) والجرمانيوم (Ge) وهو قدرة هذه الديودات على تبديد الحرارة فديودات السيلكون أكثر قدرة على تبديد الحرارة من ديودات الجرمانيوم. عندما ترتفع درجة حرارة ديودات الجرمانيوم عند زيادة درجة الحرارة عن 85°C فإن الاهتزازات الحرارية تؤثر على البنية الفيزيائية للتركيب البللوري للمادة إلى درجة تجعل عمل الديود غير موثوق، ولذلك فإن ديودات الجرمانيوم تصبح عديمة الفائدة عند درجات حرارة أكبر من 85°C.

2.2.4 التشابه بين الديود وبوابة تمرير ماء

في هذه المقارنة سنعتبر أن الديود مثل بوابة وحيدة الاتجاه وذات نابض، والنابض في هذه البوابة يماثل جهد عتبة التمرير في الديود. وفي هذه المقارنة يعمل النابض على الحفاظ على البوابة في حالة إغلاق ويجب أن يكون ضغط الماء في الطرف العلوي من البوابة كبيراً بقدر كاف للتغلب على قوة النابض وإلا فإن البوابة تبقى مغلقة ولا يمر الماء من الأعلى إلى الأسفل (إذن وظيفة قوة النابضِ تماثلُ وظيفة جهد عتبة التمرير (0.6V) في الديود). طبعاً إذا كان الديود نوع جرمانيوم فإن جهد عتبة تمريره يساوي (0.2V) والنابض المستخدم لمحاكاة هذا الجهد يجب أن يكون ذا قوة أقل من النابض المستخدم لمحاكاة ديود السيلكون. لاحظ أنه إذا تم تطبيق ضغط الماء من الأسفل، فإن السدادة (Blocker) ستمنع البوابة من الانزلاق إلى الأعلى، وبالتالي لا يمر الماء بالاتجاه العكسي، ونفس الشيء يحدث عند تطبيق جهد عكسي على الديود، فلا يمر فيه تيار بالاتجاه العكسي.



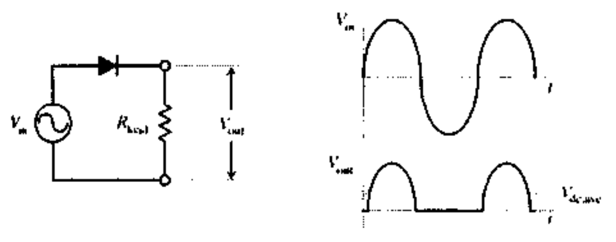
الشكل (13.4): مقارنة بين الديود وبوابة تمرير أحادية الاتجاه.

3.2.4 التطبيقات الأساسية

تستخدم الديودات في دارات التقويم (rectifier circuits) التي تحول الجهد المتناوب (ac) إلى جهد مستمر (dc)، كما تستخدم الديودات أيضاً في تطبيقات عديدة، وفيما يلي نتعرف على التطبيقات الأكثر شيوعاً للديودات.

مقوّم نصف الموجة

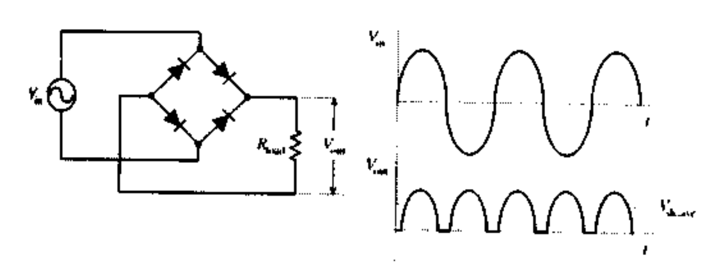
في دارة مقوِّم نصف الموجة المبينة في الشكل (14.4) يعمل الديود على تحويل جهد الدخل المتناوب (ac) إلى جهد نبضي في الخرج ففي نصف الدور الموجب لجهد الدخل يكون استقطاب الديود أمامياً ويمرر تيار عبر الديود والحمل فيتشكل على الحمل جهد موجب، أما في نصف الدور السالب فيكون استقطاب الديود عكسياً ولا يمر تيار عبر الدارة لأن الديود لا يمرر وجهد الخرج يساوي الصفر وبذلك نلاحظ أن أنصاف الدور الموجب تقريباً هي التي تمر عبر الديود إلى الخرج



الشكل (14.4): دارات تقويم نصف موجة، وموجة كاملة.

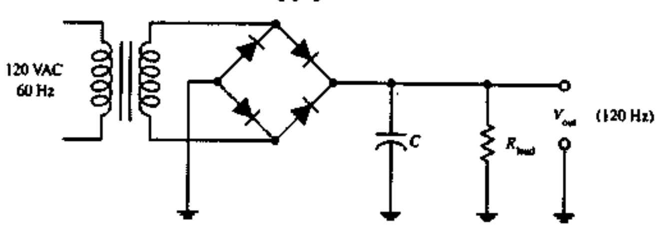
ولذلك يُسمى هذا المقوِّم بمقوِّم نصف موجة. طبعاً سيكون هناك هبوط جهد قدره (0.6V) على الديود ولذلك فإن جهد الخرج خلال نصف الدور الموجب سيكون أخفض من جهد الدخل بمقدار (0.6V). تردد جهد الخرج يساوي تردد جهد الدخل وتبلغ القيمة الوسطى لجهد الخرج حوالي (0.138) ضرب مطال جهد الخرج والمطال هو الجهد من الصفر إلى القيمة العظمى. يُستخدم عادة محول (transformer) لرفع أو خفض الجهد المتناوب قبل تطبيقه على الديود.

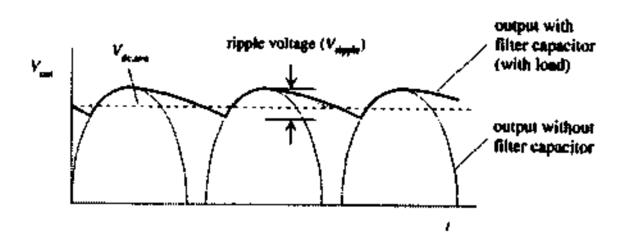
مقوِّم الموجة الكاملة



في الشكل (14.4) تُعطى دارة مقوِّم موجة كاملة يُسمى مقوِّم موجة كاملة جسري (full-wave-bridge rectifier) وهذا المقوِّم بعكس مقوم نصف الموجة لا يحجب أنصاف الدور السالب عن المرور إلى الخرج ولكنه يسمح لها بالمرور ويحولها إلى موجبة ولفهم آلية عمل هذا المقوِّم لاحق مسار التيار عبر الديودات. لاحظ أنه بسبب وجود ديودين في مسار التيار سيكون هناك فرق جهد قدره (1.2V) بين جهد الخرج وجهد الدخل، حيث هناك هبوط جهد قدره (0.6V) على الديود الواحد وبما أن مسار التيار في كل نصف دور يحوي ديودين، فإن فرق الجهد الكلي سيكون (1.2V). تردد الخرج يساوي ضعف تردد الدخل، والقيمة الوسطى لجهد الخرج تساوي تقريباً (0.636) ضرب مطال جهد الخرج والمطال هو الجهد من الصفر إلى القيمة العظمى في الخرج.

دارة أساسية لمصدر تغذية





تابع الشكل (14.4): دارات تقويم نصف موجة، وموجة كاملة.

يمكن بناء مصدر تغذية يحول الجهد المتناوب (ac) إلى مستمر باستخدام محول ومقوِّم موجة كاملة جسري، كما في الشكل (14.4). يُستخدم المحول لتخفيض الجهد المتناوب إلى قيمة مناسبة، الجهد المتناوب في ثانوي المحوِّل يُطبَّق على مقوِّم الموجة الكاملة الذي يحوله إلى جهد نبضي موجب في الخرج. يُستخدم مكثف (c) على التوازي مع الحمل من أجل تنعيم (smooth) جهد الخرج، ويجب أن يكون المكثف كبيراً إلى درجة كبيرة بحيث يُخزِّن قدراً كافياً من الطاقة التي تضمن تزويد الحمل بتيار ثابت. إذا لم يكن المكثف كبيراً إلى الدرجة الكافية، أو كان شحنه ليس بالسرعة الكافية، فإن جهد الخرج سوف ينخفض عندما يتطلب الحمل تياراً أكبر وهناك قاعدة عامة من أجل اختيار سعة المكثف.

$$(R_{Load}).(c) >> \frac{1}{f}$$

f: تردد الإشارة المقوَّمة، فإذا كان تردد جهد الدخل (60Hz) فإن تردد الإشارة المقوِّمة سيكون (120Hz). أما مقدار جهد التموُّج (ripple) وهو الانحراف عن القيمة الوسطى للجهد المستمر فيعطى تقريباً بالعلاقة التالية:

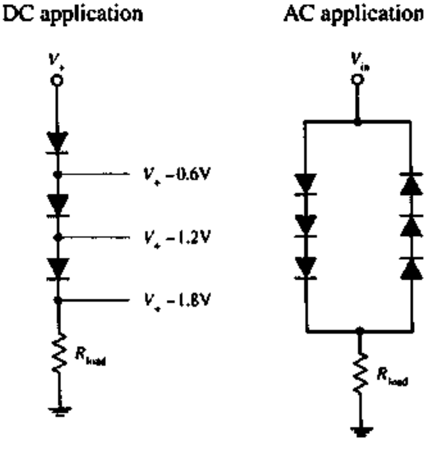
$$V_{ripple} = \frac{I_{Load}}{f.c}$$

مخفّض الجُهد

عندما يمر تيار عبر الديود، فإن هبوط الجهد على الديود يساوي تقريباً (0.6v) وذلك طبعاً إذا كان الديود سيلكونياً، وإذا تم وصل عدة ديودات على التسلسل فإن هبوط الجهد الكلي عليها هو مجموع هبوطات الجهد على الديودات، ولذلك يمكن وصل عدة ديودات على التسلسل لتأمين انخفاض معيَّن في الجهد. في الشكل (14.4) تعطى دارة خافض جهد ديودي للتطبيقات المستمرة (dc) وفيها نلاحظ أن الجهد المطبق على الحمل:

$$VLoad = (V+) - 3(0.6) = (V+) - 1.8V$$

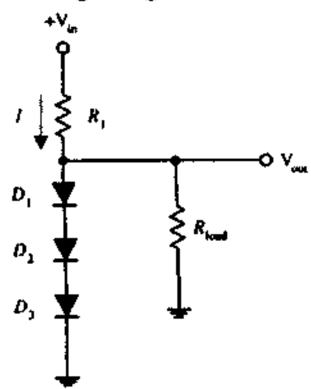
كما تُعطى دارة خافض جهد للتطبيقات المتناوبة، وفيها نلاحظ وصل مجموعتين من الديودات متعاكسة الاتجاه على التوازي، وفي كل مجموعة توصل الديودات على التسلسل.



منظم الجهد

تؤمن هذه الدارة جهد خرج ثابتاً يساوي مجموع هبوطات الجهد الأمامية على الديودات. إذا كانت D3, D2, D1 ديودات سيلكونية، فإنّ هبوط الجهد على كل ديود سيكون (0.6V)، وهبوط الجهد الكلي على الديودات الثلاثة سيكون (1.8V) وهذا يعني أن الجهد المطبق على الحمل (Vout) سوف يبقى (1.8V). R1 تعمل على حماية الديودات من التخرُّب إذا أصبحت مقاومة الحمل عالية جداً. إذا فُصل الحمل، أو إذا أصبحت مقاومة الحمل عالية جداً، فيجب أن تكون R1 مساوية تقريباً للقيمة التالية:

$$R_1 = \frac{(V_{in} - V_{out})}{I}$$



تابع الشكل (14.4): دارات تخفيض وتنظيم للجهد.

دارات ضاربات الجُهد

من المفيد أحياناً أن تكون لديك دارة مقوِّم تعطي جهد خرج مستمراً أكبر من مطال جهد الدخل المتناوب للمقوم. مع أن الطريقة المستخدمة عادة عند الرغبة في الحصول على جهد مستمر أكبر من مطال جهد الدخل المتناوب هي استخدام محوِّل رافع للجهد قبل مرحلة التقويم، إلا أنه توجد طريقة أخرى بديلة تحقق المطلوب وهي طريقة استخدام دارات ضاربات الجُهد. في الشكل (14.4) تُعطى مجموعة من دارات ضاربات الجهد والدارة الموجودة في الأعلى هي دارة مضاعف جهد تقليدية (voltage doubler). خلال نصف الدور الموجب يكون (D1) في حالة استقطاب أمامي وبذلك يُشحن المكثف (C1) إلى جهد يساوي (Vo)، أي إلى جهد مستمر يساوي القيمة العظمى للجهد المتناوب المطبق على

الدخل، أما خلال نصف الدور السالب فإن (D2) يكون في حالة استقطاب أمامي ويُشحن (C2) إلى جهد مستمر يساوي (Vo) وبما أن (C1) و(C2) موصولين على التسلسل وبالقطبيات المبينة على الشكل، فإن جهد الخرج هو مجموع جهدي المكثفين أي (2Vo)، أما الدارة الثانية فهي مغايرة من حيث الشكل للدارة الأولى وهي عبارة عن مضاعف جهد وتسمى مضخة شحنة (charge pump). خلال نصف الدور السالب يقوم المنبع بضخ شحنات إلى C1 عبر D1 في حين يكون D2 كدارة مفتوحة وخلال نصف الدور الموجب يصبح D1 كدارة مفتوحة أما (D2) فيصبح في حالة تمرير ويمكن اعتباره كدارة مقصورة وتتدفق بعضٍ من شحنة C1 إلى C2 ويستمر هذا العمل متكرراً حتى تُضخ شحنة كافية إلى (C2) جاعلة جهدها يساوي (2Vo). إحدى إيجابيات مضخة الشحنة بالمقارنة مع مضاعف الجهد التقليدي هي أن أحد أطراف منبع جهد الدخل وأحد أطراف مكثف الخرج يُوصلان إلى نقطة مشتركة، ويمكن تأريض هذه النقطة. يمكن إضافة مراحل أخرى إلى دارة مضاعف الجهد للحصول على جهود أعلى كما في الدارتين السفليتين، ففي الشكل السفلي اليساري نحصل في الخرج على جهد يساوي ثلاثة أضعاف جهد الدخل، أما في الدارة السفلية اليمينية فيمكن الحصول على جهد خرج يساوي أربعة أضعاف جهد الدخل. أحد أبرز عوائق استخدام مضاعفات الجهد هو سوء تنظيم جهد الخرج بالإضافة إلى انخفاض تيار الخرج الذي تعطيه هذه الدارات إلى الحمل.

Conventional doubler

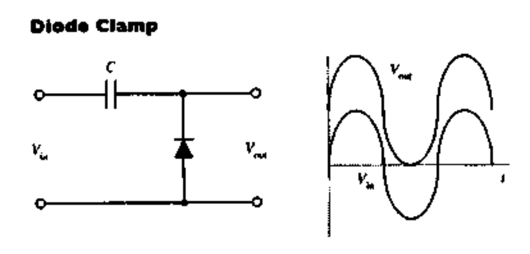
Charge pump doubler

Voltage tripler

Voltage quadrupler

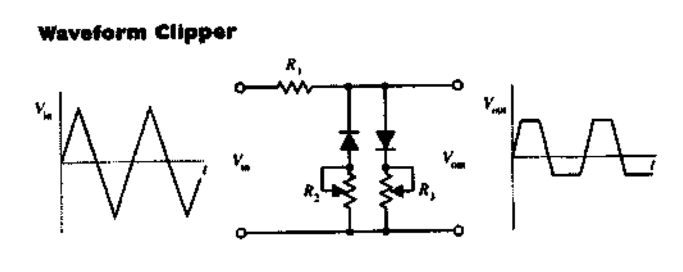
الشد الديودي

تُطبق على دخل دارة الشد الديودي المبنية في الشكل (14.4) إشارة متناوبة دوريّة تهتز بين قيم موجبة وسالبة فتقوم الدارة بإزاحة هذه الإشارة بحيث تكون إما موجبة دوماً أو سالبة دوماً. يُشحن المكثف إلى جهد مستمر يساوي مطال جهد الدخل (المطال يُقاس بين الصفر والقيمة العظمى). يتم اختيار سعة المكثف عالية بحيث تمثل قصراً بالنسبة للإشارة المتناوبة، فإذا كانت (Vin) موجة جيبيّة مثلاً فإن جهد الخرج سيكون مساوياً لمجموع (Vin) والجهد المستمر (dc) الذي شُحن المكثف إليه. بعكس اتجاه الديود في الدارة تُزاح Vout إلى الأسفل بحيث تكون دوماً سالبة.



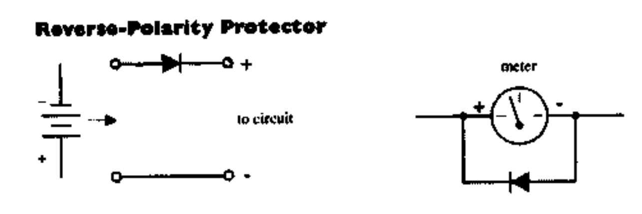
تابع الشكل (14.4): مضاعفات الجهد ودارة شد ديودية.

دارة قص موجة



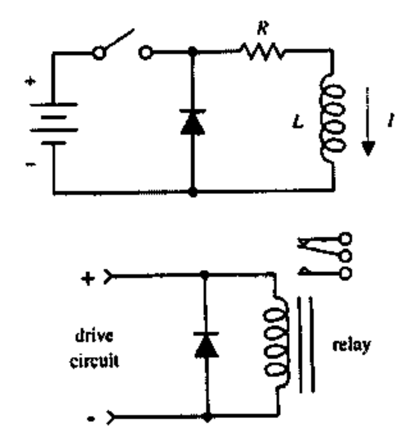
تُعطى في الشكل (14.4) دارة قص، وتستخدم هذه الدارة عادة لحماية عناصر دارة أخرى من الضرر بسبب الجهود الزائدة، كما تستخدم أيضاً لتوليد موجات بأشكال خاصة. تتحكم المقاومة (R2) بمستوى القص السفلي (lower-level clipping)، أما (R3) فوظيفتها التحكم بمستوى القص العلوي في حين تستخدم (R1) كمقاومة حماية لمنع تيار عال من المرور عبر الديود عندما تكون المقاومة المتغيرةً الموصولة معه موضوعة على قيمة تساوي الصفر.

دارة حماية من عكس القطبية



يمكن استخدام ديود واحد لحماية دارة من الضرر الذي قد يلحق بها إذا عُكست قطبية جهد التغذية المطبق عليها. فإذا تم عكس قطبية الجهد الموصول مع الدارة فإن الديود يصبح في حالة استقطاب عكسي ويمنع التيار من المرور عبر الدارة، أما في الدارة اليمينية والتي نجد فيها ديوداً موصولاً على التوازي مع مقياس فإن الديود يمنع تياراً عالياً من الدخول عبر الطرف السالب للمقياس عند وصل المقياس بشكل معكوس مع الدارة.

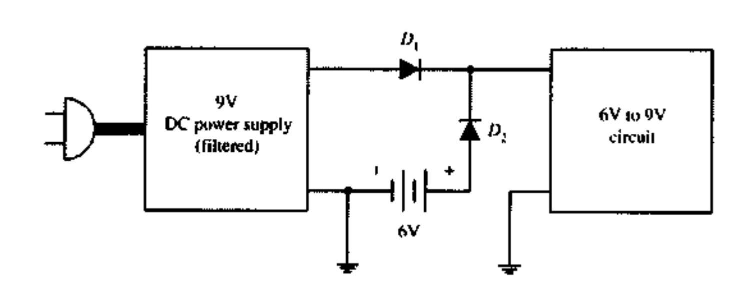
دارة حماية من الحالة العابرة



إن وضع ديود عكسي على التوازي مع حمل تحريضي يُزيل الحالات العابرة الجهدية (voltage spikes) وذلك لأن الديود ينتقل إلى حالة التمرير قبل أن يتشكل جهد كبير على طرفي الحمل، ويجب اختيار الديود بحيث يتحمل التيار المكافئ للتيار الأعظمي الذي يمكن أن يمر عبر الحمل قبل فصل التغذية عن الحمل، وتبيِّن الدارة السفلية كيفية استخدام الديود لحماية دارة من القفزات المفاجئة الجهدية التي تنشأ في الدارة عندما تتبدل حالة عمل حاكمة (dc).

تابع الشكل (14.4): دارات قص وحماية.

مصدر تغذية احتياطي من بطارية



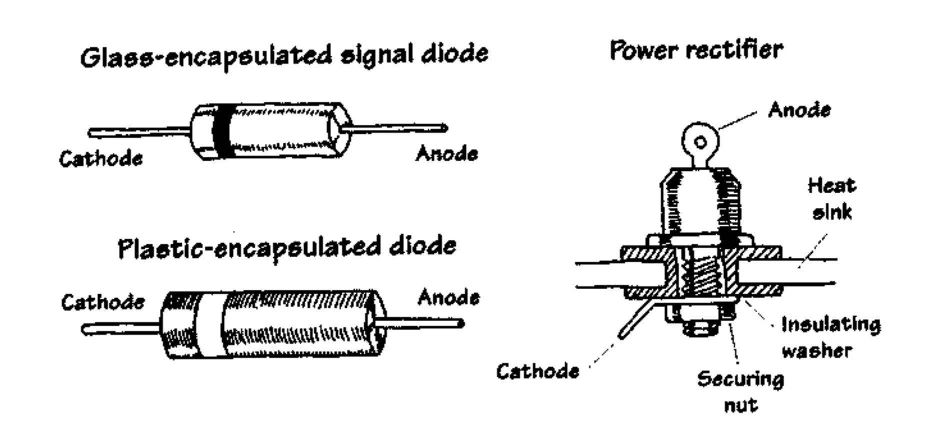
تابع الشكل (14.4): مصدر تغذية احتياطي من بطارية.

تبيِّن هذه الدارة كيفية استخدام بطارية وديودين لتأمين مصدر تغذية احتياطي لدارة تغذى في الحالة الطبيعية من مصدر تغذية يحوِّل الجهد المتناوب إلى جهد مستمر، والدارة المغذاة تعمل إذا غذيت من جهود تتراوح بين (6V) و(9V). الجهد الذي يؤمنه مصدر التغذية (ac-to dc) يساوي (9V)، أما جهد البطارية فيساوي (6V). عندما يكون مصدر التغذية في حالة عمل يكون (D1) في حالة تمرير و(D2) في حالة قطع ويُطبق على الدارة جهد يساوي (8.4V)، لأن هبوط الجهد على D1 يساوي (0.6V)، وفي نفس الوقت يكون مصعد الديود (D2) أقل إيجابية من مهبطه بمقدار (2.4V) ولذلك يكون (D2) في حالة قطع ويمنع مرور تيار من البطارية. إذا انقطعت التغذية الكهربائية المتناوبة المطبقة على دخل مصدر التغذية (9V) لسبب من الأسباب، عندها يصبح مصعد الديود (D2) أكثر إيجابية من مهبطه، ويمر تيار من البطارية إلى الحمل ويمنع الديود (D1) تيار البطارية من المرور إلى مصدر التغذية (9V).

4.2.4 أشياء هامة يجب معرفتها عن الديودات

تتوفر الديودات بأشكال وأحجام مختلفة. يتم عادة تركيب ديودات التيارات العالية على أجسام تبريد من أجل تخفيض درجة حرارتها أثناء العمل. يمكن وصل الديودات على التوازي من أجل زيادة التيار المقدَّم إلى الحمل، وعند وصل الديودات على التوازي يجب أن تكون مميزات الفولت أمبير للديودات متماثلة كي يتم توزيع التيار بشكل متساو، ويمكن وصل مقاومة على التسلسل مع كل ديود من أجل ضمان تساوي التيارات. في كافة الديودات يمر تيار عكسي عبر الديود عندما يكون الديود في حالة استقطاب عكسي ويسمى هذا التيار تيار تسرُّب (leakage current)، ولكن التسمية الشائعة له هي تيار عكسي (reverse current (I_R))، وهذا التيار صغير جداً ومن مرتبة النانو أمبير. لكل ديود جهد عكسي أعظمي مسموح وهذا الجهد عند تطبيقه بشكل عكسي على الديود، فإن الديود يتحمله دون ضرر ويرمز لها الجهد بالرمز Peak Reverse Voltage (PRV)، أما إذا تجاوز الجهد العكسي الأعظمي القيمة المسموحة، فإن تياراً عكسياً كبيراً يمر عبر الديود ويودي إلى تخريب الديود. يرمز للجهد العكسي الأعظمي أيضاً بـــ (PIV) من Peak Inverse Voltage. تتراوح قيم (PIV) للديودات من عدة فولتات وحتى عدة آلاف من الفولت. توصل الديودات على التسلسل من أجل زيادة الجهد العكسي الأعظمي الكلي المسموح تطبيقه على الديودات، وطبعاً يجب أن تكون الديودات التي توصل على التسلسل متماثلة كي تتوزع هبوطات الجهد العكسي بالتساوي على الديودات، وتوصل مع الديودات مقاومات على التوازي من أجل موازنة الجهود العكسية الهابطة عليها. شيء آخر يجب أن تعرفه عن الديود وهو التيار الأمامي الأعظمي المسموح (maximum forward current (I_F))، بالإضافة إلى السعة التي تتشكل على متصل الديود، وأيضاً زمن الاستعادة العكسي (reverse recovery time). تبدأ تسمية أغلب أنواع الديودات بالرقم (1)، مثل (1N4003). يتم عادة تمييز أطراف الديود عن بعضها بوضع علامة على جسم الديود على شكل خط قريب إلى طرف المهبط ويكون لون الخط أبيض في الديودات ذات الغلاف الخارجي المصنوع من البلاستيك، أما في الديودات المغلفة بالزجاج فيكون لون الخط أسود، انظر الشكل (15.4).

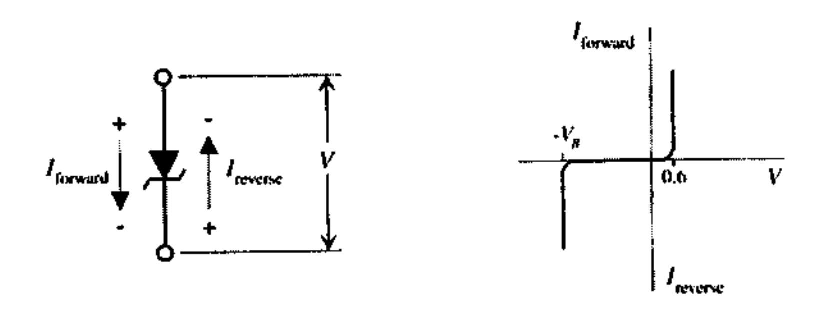
وإذا لم يكن هناك علامة على الديود، فإن المهبط يمكن أن يكون على شكل برغي يتم إدخاله عبر الجسم المبدِّد للحرارة ويُثبت بعزقة (nut). تستخدم مادة عازلة كهربائياً مثل الفيبر (fiber) أو الميكا (mica) بين المهبط وجسم التبريد لعزل جسم التبريد كهربائياً عن مهبط الديود، كما يوضع شحم سيلكوني خاص بين قطعة الميكا مثلاً وجسم التبريد لزيادة الناقلية الحرارية.



الشكل (15.4): العلامة التي توضع بطرف المهبط على جسم الديود.

5.2.4 ديودات الزينر

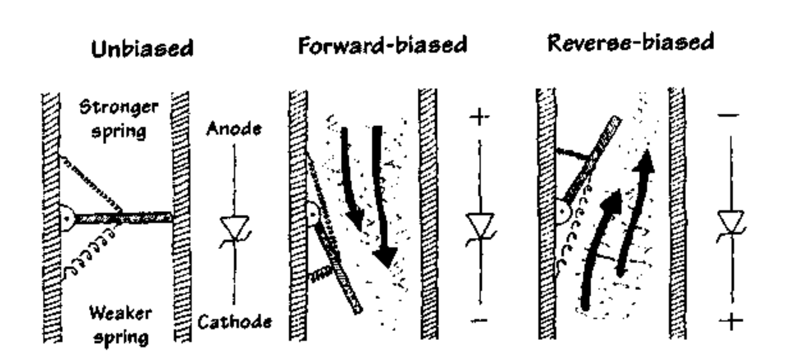
ثنائي الزينر أو ديود الزينر هو ديود يعمل كديود عادي إذا كان استقطابه أمامياً، ولكنه يمتاز بالقدرة على التمرير بالاتجاه العكسي عندما يصل الجهد العكسي المطبق عليه إلى قيمة يُرمز لها بالرمز (VB) ويسمى الجهد باسم جهد الانهيار للديود (breakdown voltage). تتراوح قيم جهود الانهيار لديودات الزينر من عدة فولتات وحتى مئات الفولت، ويمكن زيادة مقدار جهد الانهيار بوصل ديودات الزينر على التسلسل. يبيِّن الشكل (16.4) رمز ديود الزينر ومميزة الفولت-أمبير الأمامية والعكسية له (مميزة الفولت-أمبير هي علاقة التيار الذي يمر عبر الديود بالجهد المطبق عليه).



الشكل (16.4): رمز ديود الزينر ومميزة الفولت-أمبير.

6.2.4 النموذج المائي المكافئ للزينر

في هذه المقارنة بين ديود الزينر ونموذج مائي يتم اعتبار الزينر كبوابة ثنائية الاتجاه ذات نابض أمامي يشبه من حيث التأثير جهد عتبة التمرير الأمامي للديود ونابض عكسي يشبه من حيث التأثير جهد الانهيار للزينر (VB). وهذه المقارنة بين الزينر ونموذج مائي تشبه كثيراً المقارنة التي أجريت سابقاً بين الديود العادي ونموذج مائي والفارق الوحيد هو عدم وجود سدّادة (Block) لتمنع البوابة من الحركة بالاتجاه العكسي وبدلاً عن ذلك يتم استخدام نابض عكسي يبقي البوابة في حالة إغلاق. إذا تم تطبيق الماء في الاتجاه العكسي، فإن البوابة تفتح فقط إذا كان ضغط الماء أكبر من قوة ضغط النابض العكسي. إن استخدام نابض استقطاب عكسي بقوة أكبر في النموذج المائي يطابق حالة استخدام زينر بجهد انهيار مرتفع.



الشكل (17.4): مقارنة بين زينر ونموذج مائي

7.2.4 التطبيقات الأساسية لديودات الزينر

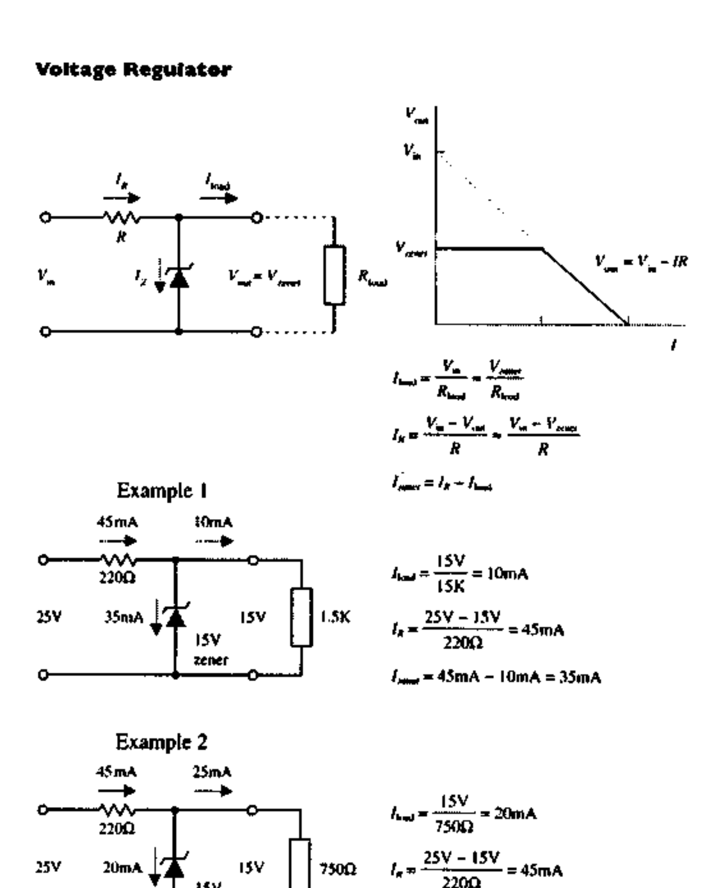
تستخدم ديودات الزينر عادة في تطبيقات تنظيم الجهد (voltage regulation)، وفيما يلي نتعرف على بعض التطبيقات.

منظم جهد *Voltage Regulator*

في الشكل (18.4) تُعطى دارة منظم جهد باستخدام ديود زينر، ووظيفة هذه الدارة هي تنظيم الجهد المطبق على الحمل، فعندما يزداد جهد الدخل ويحاول زيادة جهد الخرج إلى قيمة أعلى من (V_{Zener})، فإن ديود الزينر يمتص تياراً أعلى ويمر هذا التيار عبر الزينر المستقطب في الاتجاه العكسي ويبقى (Vout) جهد الخرج مساوياً جهد الزينر (V_{Zener}). المقاومة الموجودة في الدارة هي مقاومة لتحديد التيار الذي يمر عبر الزينر عندما يُفصل الحمل من الدارة وبذلك تتم حماية الزينر من التيار الزائد. وتحسب المقاومة (R) من العلاقة:

$$R = \frac{V_{in} - V_{Zener}}{I_{max,Zener}}$$

Imax,Zener: هو التيار الأعظمي المسموح مروره عبر الزينر.



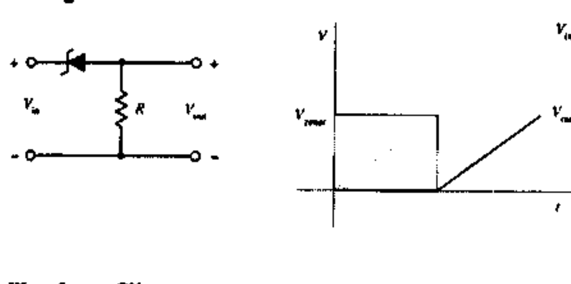
الشكل 18.4: دارات تنظيم الجهد.

يجب أن تكون المقاومة (R) قادرة على تبديد الاستطاعة المحسوبة من العلاقة:

$$P_R = IV_R = (I_{max,Zener}).(V_{in} - V_{Zener})$$

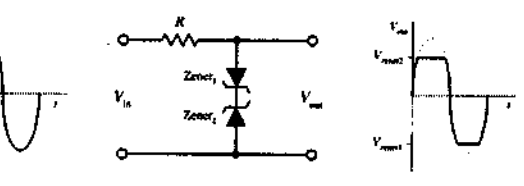
مزيح جهد

تزيح الدارة المبينة في الشكل (18.4) جهد الدخل إلى الأسفل بمقدار (V_{Zener}).



دارة قص موجة

في دارة القص تم وصل ديودي زينر على التسلسل والتعاكس من أجل قص قمم موجة الدخل الموجبة والسالبة، وبذلك فإن إشارات دخلٍ جيبية يمكن أن تتحول إلى موجة مربعة تقريبا ويمكن وصل هذه الدارة إلى خرج مصدر تغذية مستمر (power supply) من أجل منع القفزات الجهدية المفاجئة (voltage spikes) من الوصول إلى الدارة الموصولة مع منبع التغذية. وجهود الانهيار للديودات يتم اختيارها وفقاً للتطبيق المطلوب. لاحظ من الشكل أن أعلى قيمة موجبة لجهد الخرج تساوي (V_{Zener2}) وأخفض قيمة سالبة تساوي ($-V_{Zener1}$).

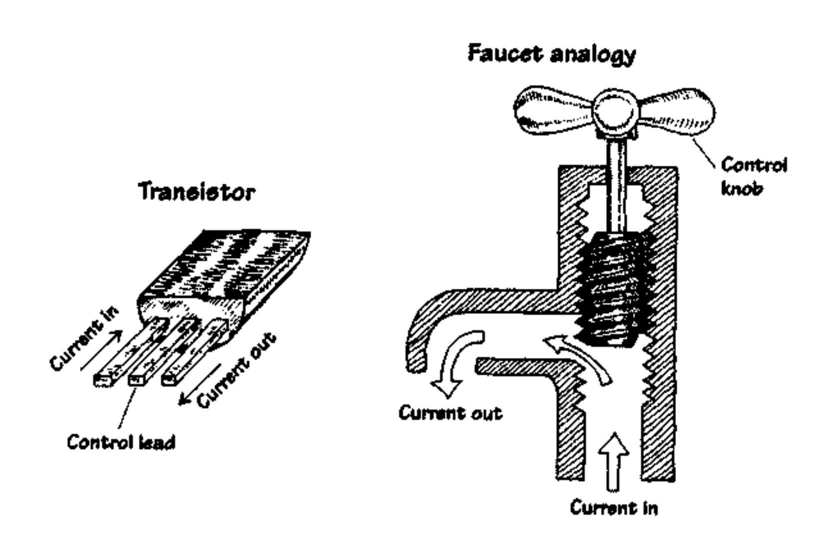


تابع الشكل 18.4: دارات إزاحة وقص.

3.4 الترانزستورات

الترانزستورات هي عناصر إلكترونية تصنع من أنصاف النواقل وتستخدم إما كمفاتيح متحكم بها كهربائياً أو كمضخمات، ويمكن التحكم بالتيار المار في الترانزستور بطريقة مشابهة لطريقة التحكم بالماء المتدفق عبر صنبور. يمكن التحكم بالماء المتدفق عبر الصنبور بواسطة لولب الصنبور، أما في الترانزستور فيتم التحكم بالتيار بواسطة جهد أو تيار تحكم صغير يُطبق على طرف (رِجل lead) التحكم فيتم التحكم بتيار كبير يمر بين الطرفين الآخرين للترانزستور. للترانزستور كما هو واضح في الشكل (19.4) ثلاث أرجل، إحدى هذه الأرجل هي رِجل التحكم.

تستخدم الترانزستورات في أغلب الدارات الإلكترونية كدارات التضخيم ودارات الاهتزاز، ودارات منابع التيار، ودارات تنظيم الجهد، ودارات مصادر التغذية، وكذلك في بناء الدارات المتكاملة (ICs)، وكذلك في دارات التحكم وخاصة عندما يتم استخدام تيار صغير للتحكم بتيار كبير. كما تستخدم الترانزستورات أيضاً كمفاتيح إلكترونية.



الشكل (19.4): مقارنة بين الترانزستور وصنبور الماء.

1.3.4 مقدمة إلى الترانزستورات

تتوفر أنواع مختلفة من الترانزستورات، وتختلف الترانزستورات عن بعضها بمواصفاتها التيارية والتحكميّة، فبعضٍ الترانزستورات تمتلك ميزة التحكم التياري المتغيِّر، وبعضها الآخر لا يملك هذه الميزة، وبعض الترانزستورات تكون عادة في حالة قطع حتى يُطبق جهد على قاعدة الترانزستور أو على بوابته، أما البعض الآخر فبالعكس يكون في حالة عمل حتى يُطبق جهد على قطب التحكم. وعندما يكون الترانزستور في حالة عمل (on) يمر تيار عبر الترانزستور ولكن مقدار هذا التيار يختلف من حالة إلى أُخرى. تحتاج بعض الترانزستورات كي تُصبح في حالة عمل إلى تطبيق جهد على رِجل التحكم وبنفس الوقت لا بد من مرور تيار في طرف (رِجل) التحكم مع وجود الجهد المطبق على طرف التحكم، بينما يكفي تطبيق جهد على طرف التحكم كي يعمل الترانزستور في أنواعٍ أخرى، كما أن جهد التحكم المطلوب موجب في بعض الأنواع وسالب في أنواع أخرى.

العائلات الأساسية للترانزستورات هي عائلة الترانزستورات ثنائية القطبية (bipolar transistors) والترانزستورات الحقلية (field-effect transistors) والتي يُرمز لها بشكلٍ مختصر بالرمز (FETs). الفرق الأساسي بين هاتين العائلتين هو أن الترانزستورات ثنائية القطبية تحتاج إلى تيار استقطاب في الدخل، أما ترانزستورات الـ FET فتحتاج فقط إلى جهد، وعملياً لا تحتاج إلى تيار في الدخل، وتعتمد الترانزستورات ثنائية القطبيّة في عملها على حركة نوعي حوامل الشحنات (الإلكترونات والثقوب) ولذلك تسمى ترانزستورات ثنائية القطبيَّة، أما الترانزستورات الحقلية فتعتمد في مبدأ عملها على حركة نوع واحد من حوامل الشحنات. بما أن الترانزستورات الحقلية لا تستهلك في الدخل أي تيار، لذلك يمكن اعتبار ممانعة دخلها (input impedance) عالية جداً، من مرتبة ($10^{14}\Omega$) وهذا يعني أن قطب التحكم للترانزستور الحقلي لن يكون له أي تأثير على مصدر القيادة الذي يقود الترانزستور الحقلي (لأن التأثير يكون ناتجاً عن التيار المستهلك وهنا كما ذكرنا لا يوجد تيار مستهلك). في الترانزستورات ثنائية القطبية يمكن أن يَستهلك طرف التحكم تياراً صغيراً من دارة القيادة فيؤثر ذلك على ديناميكية عمل دارة القيادة.

تعتبر ترانزستورات الـ FET أكثر انتشاراً في التطبيقات هذه الأيام وذلك بالمقارنة مع الترانزستورات ثنائية القطبية وذلك بسبب ميزات الترانزستورات الحقلية، فالترانزستورات الحقلية تمتاز عن ثنائية القطبية بالأمور التالية:

- لا تستهلك تياراً في طرف الدخل.
- عملية إنتاجها أسهل من الترانزستورات ثنائية القطبية.

- كلفة إنتاجها أرخص (لأنها تحتاج حجماً اقل من شريحة السيلكون) وبالتالي فإن حجمها يمكن أن يكون صغيراً جداً مما يجعلها ملائمة لتصنيع الدارات المتكاملة.

أحد أبرز سلبيات الترانزستورات الحقلية هو انخفاض قيمة ناقليتها التبادلية (tranceconductance) مقارنة مع الترانزستورات ثنائية القطبيّة وذلك عند نفس مستويات التيارات، ولذلك فإن ربح الجهد لن يكون كبيراً كما هي الحال عند استخدام ترانزستورات ثنائية القطبية. نادراً ما تستخدم الترانزستورات الحقلية في دارات المضخمات البسيطة (simple amplifiers)، إلا إذا كان ممانعة الدخل العالية جداً وتيار الدخل المنخفض من أهم المتطلبات الواجب تحقيقها في المضخم.

تُعطى في الجدول (1.4) مراجعة لبعض أكثر الترانزستورات استخداماً. إن كلمة (normally) والتي تعني بشكل طبيعي والمستخدمة في هذا الجدول تدل على الحالة التي يكون فيها قطب التحكم موصولاً مع أحد الأقطاب الأخرى للترانزستور (مع الباعث مثلاً أو مع المنبع)، أما عبارات (on) و(off) فلا تعني أن الترانزستور يمرر أقصى تيار ممكن في حالة (on) ولا يمرر نهائياً أي تيار في حالة (off) وذلك لأن التيار الذي يمر في الترانزستور الموجود في حالة (on) يتعلق بتيار طرف التحكم إذا كان الترانزستور ثنائي القطبية وبجهد التحكم إذا كان الترانزستور من نوع FET. سوف تُناقش الترانزستورات الواردة في هذا الجدول بتفصيل أكثر في الفقرات القادمة.

الجدول (1.4): مراجعة للترانزستورات

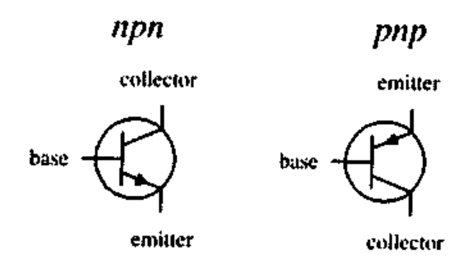
نوع الترانزستور	رمز الترانزستور	نمط العمل
ثنائي القطبية	C B E *npn*	يكون هذا الترانزستور في الحالة الطبيعية في حالة قطع ولكن تطبيق جهد موجب صغير بين القاعدة والباعث يؤدي إلى مرور تيار في القاعدة وينتقل الترانزستور إلى حالة (on) فيمر تيار كبير بين المجمع والباعث. يعمل هذا الترانزستور عندما يكون $V_C > V_E$ ويستخدم كمفتاح ومضخم.
	C B E *pnp*	يكون هذا الترانزستور في الحالة الطبيعية في حالة قطع ولكن تطبيق جهد سالب صغير وتيار صغير على القاعدة (B) يؤدي إلى نقل الترانزستور إلى حالة (on)، وبذلك يمر تيار كبير بين المجمع والباعث. يعمل هذا الترانزستور عندما يكون $V_E > V_C$ ويستخدم في التضخيم وكذلك كمفتاح إلكتروني.
ترانزستور حقلي ذو متصل junction FET	D G S *n-channel*	في الحالة الطبيعية يكون الترانزستور (on) وعند تطبيق جهد سالب صغير على بوابته (G) بالنسبة للمنبع (S) ينتقل الترانزستور إلى حالة قطع ويتوقف مرور تيار المصرف. يعمل عندما يكون $V_D > V_S$ ولا يحتاج إلى تيار بوابة. يستخدم في التضخيم وكذلك كمفتاح إلكتروني.
	D G S *p-channel*	في الحالة الطبيعية يكون هذا الترانزستور في حالة (on)، ولكن تطبيق جهد موجب صغير على البوابة ينقله إلى حالة (off) ويتوقف مرور التيار في المصرف، يعمل عندما يكون $V_S > V_D$ ولا يحتاج إلى تيار بوابة. يستخدم إما في التضخيم أو كمفتاح إلكتروني.

نوع الترانزستور	رمز الترانزستور	نمط العمل
نمط مقلل MOSFET	D G S *n-channel*	في الحالة العادية (الطبيعية) يكون في حالة (on) وبتطبيق جهد سالب على البوابة (G) بالنسبة للمنبع (S) ينتقل إلى القطع ويتوقف مرور تيار المصرف. يعمل عندما يكون $V_B > V_S$ ولا يحتاج تيار دخل يستخدم في التضخيم أو كمفتاح.
	D G S *p-channel*	يكون عادة وفي الوضع الطبيعي في حالة (on) ولكن تطبيق جهد موجب صغير على البوابة (G) مقارنة مع المنبع (S) ينقل الترانزستور إلى القطع ويتوقف مرور التيار في دارة الصرف، يعمل عندما يكون $V_S > V_D$. لا يحتاج إلى تيار بوابة، ويستخدم في التضخيم أو كمفتاح إلكتروني.
نمط محسَّن MOSFET	D G S *n-channel*	يكون في الحالة الطبيعية في وضع (off) ولكن بتطبيق جهد موجب صغير على البوابة (G) بالنسبة للمنبع (S) ينتقل إلى حالة (on)، ويمر تيار كبير في دارة الصرف، لا يحتاج إلى تيار بوابة، ويستخدم إما كمضخم أو كمفتاح يعمل عندما يكون $V_D > V_S$.
	D G S *p-channel*	في الحالة الطبيعية يكون الترانزستور في حالة (off) ولكن تطبيق جهد سالب صغير على (G) بالمقارنة مع (S) ينقل الترانزستور إلى حالة (on). يعمل عندما يكون $V_S > V_D$. لا يحتاج إلى تيار بوابة. يستخدم إما كمضخم أو كمفتاح.
ترانزستور حقلي وحيد المتصل Unijunction FET (UIT)	B_2 E B_1 *UJT*	يمر عادة تيار صغير جداً من القاعدة (B2) إلى القاعدة (B1) ولكن تطبيق جهد موجب على الباعث (E) بالنسبة للقاعدة (B1) أو للقاعدة (B2) يؤدي إلى زيادة التيار. يعمل عندما يكون $V_{B2} > V_{B1}$ ولا يحتاج إلى تيار بوابة. يستخدم فقط كمفتاح.

2.3.4 الترانزستورات ثنائية القطبية

الترانزستورات ثنائية القطبية هي عبارة عن عناصر ذات ثلاثة أقطاب ويمكن استخدامها كمفاتيح متحكم بها كهربائياً أو كمضخمات وتتوفر هذه الترانزستورات بنوعين (npn) و(pnp) كما في الشكل (20.4). في الترانزستور (npn) يُطبق جهد استقطاب موجب على قاعدة الترانزستور (B) بحيث تصبح القاعدة (B) موجبة بالنسبة للباعث (E) فيمر تيار عبر القاعدة ويسمح هذا التيار الصغير الذي يمر في القاعدة بالتحكم بتيار أكبر يمر في دارة المجمع (collector)-باعث (emitter).

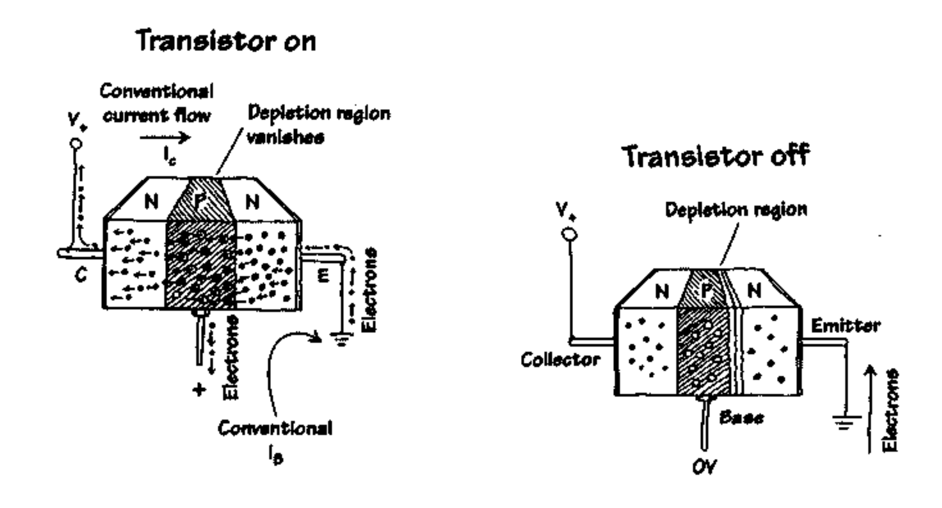
الترانزستورات ثنائية القطبيّة عناصر مفيدة جداً وخاصية التحكم بتيارها باستخدام إشارة تحكم تُطبق على الدخل يجعل من هذه الترانزستورات عناصر أساسية في دارات المفاتيح المتحكم بها إلكترونياً، وكذلك في دارات التحكم بالتيار وفي منظمات الجهد ودارات التضخيم والهزازات (oscillators) وفي دارات الذواكر (memory circuits).



الشكل (20.4): رموز الترانزستورات ثنائية القطبيّة.

مبدا عمل الترانزستورات ثنائية القطبية

يبيِّن الشكل (21.4) نموذجاً بسيطاً يوضح مبدأ عمل الترانزستور (npn)، في الترانزستور pnp تعكس قطبيات مناطق الترانزستور واتجاهات التيارات. يتكون الترانزستور npn من ثلاث مناطق سيلكونية، منطقة نوع (p) بين منطقتين نوع (n). تتصل هذه المناطق مع العالم الخارجي بأطراف تسمى أرجل، وللترانزستور ثلاث أرجل هي: القاعدة (B) وهي الرجل المتصلة مع المنطقة نوع (p) الواقعة بين المناطق (n) في الترانزستور npn أما المنطقة (n) الطرفية اليمينية فتسمى باعث (Emitter) والطرفية اليسارية فتسمى مجمع (Collector). عندما لا يُطبق أي جهد على قاعدة (B) الترانزستور، فإن الإلكترونات في الباعث (E) لا تنتقل إلى المجمع (C) بسبب المتصل (pn). تذكر أنه كي تعبر الإلكترونات المتصل pn فإنها تحتاج إلى تطبيق جهد استقطاب ليعطي الإلكترونات طاقة كافية للتغلب على القوة الذرية (atomic force) التي تمسك هذه الإلكترونات في الطرف (n)، لاحظ أنه إذا تم تطبيق جهد سالب على القاعدة فإن الأمور تسوء بالنسبة لحركة الإلكترونات لأن المتصل pn يصبح مستقطباً عكسياً ونتيجة ذلك تنشأ منطقة مجردة وتمنع الإلكترونات من المرور.



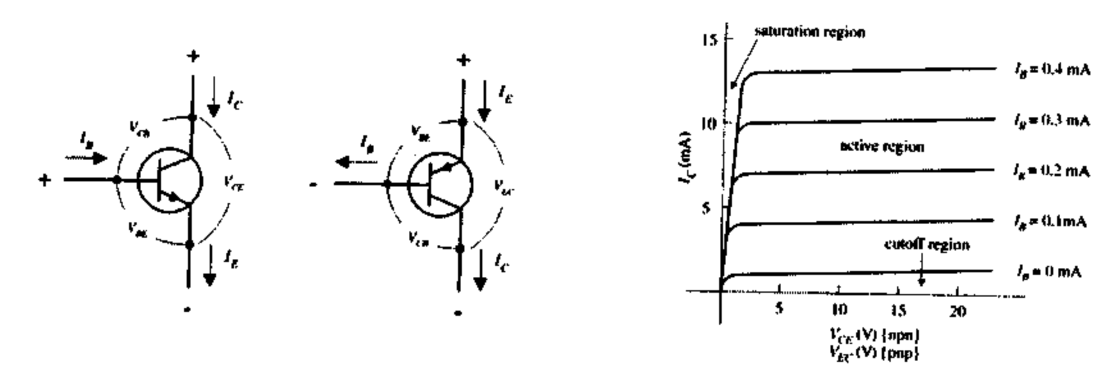
الشكل (21.4): بنية ومبدأ عمل الترانزستورات ثنائية القطبيّة.

إذا تم تطبيق جهد موجب (على الأقل 0.6V) على قاعدة الترانزستور (npn)، فإن المتصل pn بين القاعدة والباعث يصبح في حالة استقطاب أمامي وخلال حالة الاستقطاب الأمامي فإن الإلكترونات المتحررة من الروابط الذرية في منطقة الباعث (E) تنجذب إلى القاعدة الموجبة، وبما أن منطقة القاعدة تكون عادة رقيقة (قليلة السماكة) لذلك فإن عدداً كبيراً من الإلكترونات التي دخلت القاعدة قادمة من المجمع تقفز إلى المجمع. بزيادة جهد القاعدة يزداد عدد الإلكترونات التي تقفز

إلى المجمع ويزداد تيار المجمع (أي التيار بين الباعث والمجمع). تذكر أن جهة التيار الاصطلاحية هي عكس جهة حركة الإلكترونات. وهكذا وبلغة التيار الاصطلاحي يمكن القول إن تطبيق جهد موجب وتيار على القاعدة يؤدي إلى مرور تيار موجب (I) من المجمع إلى الباعث.

المبدأ النظري

يبيِّن الشكل (22.4) مجموعة من منحنيات الخرج المميِّزة للترانزستور ثنائي القطبيّة، وتبيِّن هذه المنحنيات المميزة تأثير تيار القاعدة (I_B) والجهد بين الباعث والمجمع (V_{EC}) على تيار المجمع (I_C) أو على تيار الباعث (I_E)، وكما سنجد فيما بعد فإن (I_C) يساوي تقريباً (I_E).



الشكل (22.4): منحنيات الخرج المميّزة للترانزستورات ثنائية القطبيّة.

عند شرح مبدأ عمل الترانزستورات ثنائية القطبيّة تستخدم مجموعة من المصطلحات مثل:

منطقة الإشباع (saturation region)، منطقة القطع (cutoff region)، الاستقطاب (bias)، ونقطة العمل الساكنة (quiescent point (Q-point. تدل منطقة الإشباع على منطقة يمر فيها تيار أعظمي في الترانزستور ويعمل فيها الترانزستور كمفتاح مغلق (closed switch) بين الباعث والمجمع. أما منطقة القطع فتدل على منطقة قريبة من محور الجهد في مميزات الخرج وفيها يعمل الترانزستور كمفتاح مفتوح (open switch) ويمر خلال الترانزستور تيار صغير جداً في نمط العمل هذا.

المنطقة الفعالة أو منطقة العمل الفعال (Active mode/region) تصف عمل الترانزستور في المنطقة الواقعة على يمين منطقة الإشباع، وفوق منطقة القطع، وفي هذه المنطقة تكون العلاقة بين التيارات (I_E, I_C, I_B) خطيّة.

يدل الاستقطاب (Bias) على جهود وتيارات ساكنة في الترانزستور ويتم ضبط الجهود المستمرة المطبقة على الترانزستور بالاختيار المناسب لمقسمات الجهد بحيث نحصل على التيارات المرغوبة وهذه التيارات تصف ما يسمى نقطة عمل ساكنة للترانزستور.

بعض القواعد الهامة

القاعدة (1)

في الترانزستور npn يجب أن يكون جهد المجمع (V_C) أكبر من جهد الباعث (V_E) على الأقل ببضعة أعشار الفولت، وإلا فإن التيار لا يمر بين المجمع والباعث (collector-to-emitter)، بصرف النظر عن الجهد المطبق على القاعدة. في ترانزستور pnp يجب أن يكون جهد الباعث أكبر من جهد المجمع وأيضاً على الأقل ببضعة أعشار الفولت.

القاعدة (2)

يوجد هبوط جهد بين القاعدة والباعث قدره (0.6V) في ترانزستور npn، أما في ترانزستور pnp فيوجد زيادة في الجهد قدرها (0.6V) من القاعدة إلى الباعث وهذا يعني أن جهد القاعدة في ترانزستور npn يجب أن يكون أكبر بحوالي (0.6V) على الأقل من جهد الباعث وإلا فإن الترانزستور لن يمرر تياراً بين الباعث والمجمع، أما في ترانزستور pnp فإن جهد القاعدة V_B يجب أن يكون أخفض بـ (0.6V) على الأقل من جهد الباعث وإلا فإن الترانزستور لا يمرر تياراً من المجمع إلى الباعث.

القوانين

إن القانون الأساسي المستخدم لوصف سلوك الترانزستور ثنائي القطبيّة (على الأقل في منطقة العمل الفعالة) هو:

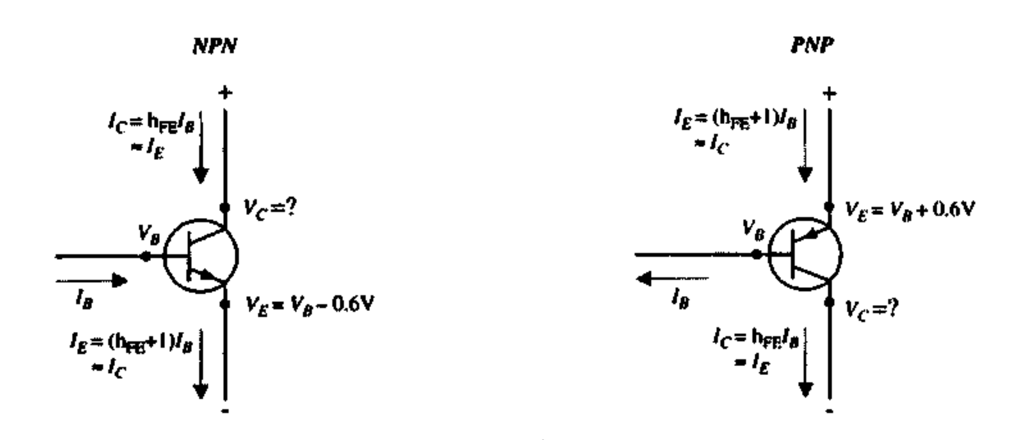
$$I_C = h_{FE} . I_B = \beta . I_B$$

I_B: تيار القاعدة

I_C: تيار المجمع

h_{FE} والذي يرمز له أيضاً بـــ (β): ربح التيار (current gain).

ولكل ترانزستور (h_{FE}) خاصٍ به، وغالباً ما يتم اعتبار (h_{FE}) للترانزستور ثابتاً وتتراوح قيمة (h_{FE}) للترانزستورات بين (10) و(500) ولكنه قد يتغير قليلاً بتغيُّر درجة الحرارة وكذلك بتغيرات الجهد بين الباعث والمجمع، وعادة يُعطى h_{FE} في جداول مواصفات الترانزستور. فيما يلي توضيح لمعنى ربح التيار في الترانزستور. إذا كان لديك ترانزستور له (h_{FE}) يساوي (100) فإذا طبق تيار قدره (1mA) على القاعدة في ترانزستور (npn) أو سُحب تيار قدره 1mA من قاعدة ترانزستور pnp فإن التيار الذي سيمر في دارة المجمع سيكون (100mA)، ومن المهم جداً أن نذكر هنا أن علاقة ربح التيار صحيحة في الترانزستور فقط في حال تحقق القاعدة (1) والقاعدة (2) المذكورتين سابقاً، ويعني ذلك أن الترانزستور يعمل في المنطقة الفعالة. في الواقع هناك حد أعظمي للتيار الذي يمكن أن يمر عبر ترانزستور معيَّن وكذلك هناك حد أعظمي للجهد الذي يمكن تطبيقه على ترانزستور، وسوف نناقش التيار الأعظمي في ترانزستور والجهد الأعظمي الذي يمكن أن يُطبق عليه لاحقاً في هذا الفصل. يبيِّن الشكل (23.4) اتجاهات التيارات في الترانزستورات npn وpnp وقطبيات الجهود التي تُطبق على الأقطاب (الأطراف أو الأرجل).



الشكل (23.4): اتجاهات تيارات الترانزستورات وقطبيات جهود الأقطاب.

حسب مبدأ انحفاظ التيار (وحسب اتجاهات الأسهم في الشكل 23.4) يمكن الوصول إلى العلاقة التالية بين تيارات الترانزستور (تيارات القاعدة والباعث والمجمع) وهذه العلاقة مفيدة وهامة جداً.

$$I_E = I_C + I_B$$

ومن هذه العلاقة وعلاقة ربح التيار يمكن الحصول على علاقة بين التيار (I_E) والتيار (I_B).

$$I_E = h_{FE} \cdot I_B + I_B = (h_{FE} + 1) \cdot I_B$$

بمقارنة هذه العلاقة مع: $I_C = h_{FE} \cdot I_B$

نلاحظ أن I_E يزيد عن I_C بمقدار I_B فإذا كانت h_{FE} أكبر بكثير من الواحد عندها نستطيع أن نكتب:

$$I_C \approx I_E$$

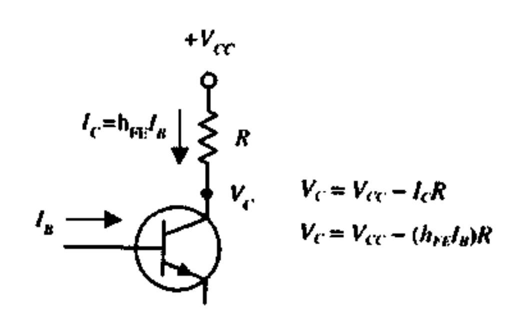
وأخيراً فإن المعادلة التالية هي تعبير عن القاعدة (2) بمعادلة رياضية:

$$V_{BE} = V_B - V_E = +0.6V(npn)$$

$$V_{BE} = V_B - V_E = -0.6V(npn)$$

يبيّن الشكل (23.4) كافة تيارات الفروع وجهود الأطراف، لاحظ وجود إشارة استفهام إلى جوار رمز جهد المجمع، ومن الملاحظ أنه لا يمكن تحديد V_C في هذه الأشكال لأن V_C تتعلق بقيمة الجهد المستمر الذي يُطبق على الترانزستور، فمثلاً في الشكل (24.4) لإيجاد الجهد V_C يجب معرفة هبوط الجهد على المقاومة (R) وبما أن التيار الذي يمر في المقاومة (R) هو $I_C = (h_{FE}) \cdot I_B$ فإن هبوط الجهد على المقاومة (R) سيكون (R) . (I_C) وبالتالي فإن:

$$V_C = V_{CC} - I_C \cdot R = V_{CC} - (h_{FE} \cdot I_B) \cdot R$$



الشكل (24.4): شكل لحساب V_C في دارة ترانزستور.

من الجدير بالذكر هنا أن هذه المعادلات هي معادلات مثالية، وفي الواقع فإنّ هذه المعادلات قد تؤدي إلى نتائج غير واقعية وذلك إذا كانت التيارات والجهود غير واقعة ضمن الحدود المسموحة والتي توضحها المنحنيات المميِّزة للترانزستور. إذن لا يجوز تطبيق هذه العلاقات دون أخذ مميزات الترانزستور بالاعتبار، وإلا فإن النتائج التي تحصل عليها لن تكون ممكنة فيزيائياً. ملاحظتنا الأخيرة في موضوع مبدأ العمل النظري للترانزستور تتعلق بما يسمى مقاومة النقل r_{tr} (transresistance) ومقاومة النقل هذه تمثل مقاومة صغيرة لمتصل القاعدة-باعث للترانزستور. تتعلق قيمة هذه المقاومة بدرجة الحرارة وبتيار الباعث والمعادلة التالية هي معادلة تقريبيّة للمقاومة (r_{tr}):

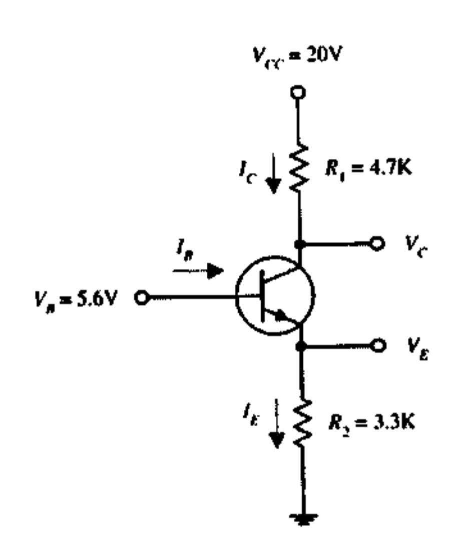
$$r_{tr} = \frac{0.026V}{I_E}$$

في العديد من الحالات تكون المقاومة (r_{tr}) صغيرة (عادة أقل من 1000Ω) ولا تسبب هذه المقاومة -التي يمكن إهمالها في بعض الحالات- أي تغيّر في مبدأ العمل. أحياناً لا يجوز إهمال هذه المقاومة لأن وجودها يؤثر بشكلٍ أساسي على أداء الترانزستور، وسوف نتوسع في شرح مفهوم وتأثير هذه المقاومة لاحقاً في هذا الفصل.

مثال (1):

في دارة الشكل (25.4) تعطى: $V_B = 5.6V$، $V_{CC} = +20v$، $R1 = 4.7k\Omega$، $R2 = 3.3k\Omega$ و $h_{FE} = 100$، أوجد V_E، I_E، I_B، I_C.

الحل:



الشكل (25.4): دارة المثال (1).

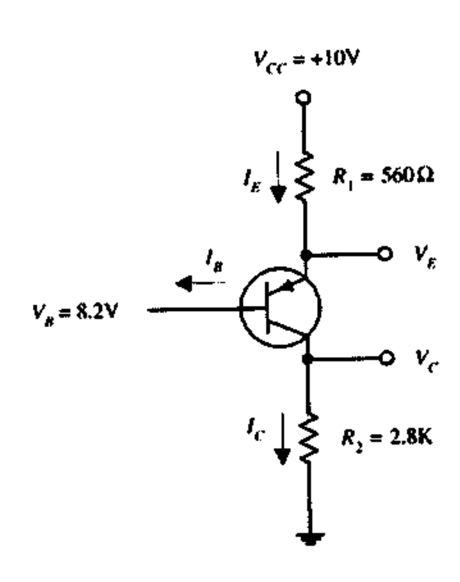
$$V_E = V_B - 0.6 = 5.6 - 0.6 = 5V$$
$$I_E = \frac{V_E}{R_2} = \frac{5V}{3300\Omega} = 1.5mA$$
$$I_B = \frac{I_E}{(1+h_{FE})} = \frac{1.5mA}{1+100} = 0.015mA$$
$$I_C = I_E - I_B \approx I_E = 1.5mA$$
$$V_C = V_{CC} - I_C R_1 = 20V - (1.5mA)(4700\Omega) = 13V$$

مثال (2):

في دارة الشكل (26.4) تعطى $V_{CC} = +10V;\ V_B = 8.2V;$
$R1 = 560\Omega;\ R2 = 2.8k\Omega;\ h_{FE} = 100$

أوجد I_B، I_C، I_E، V_E.

الحل:



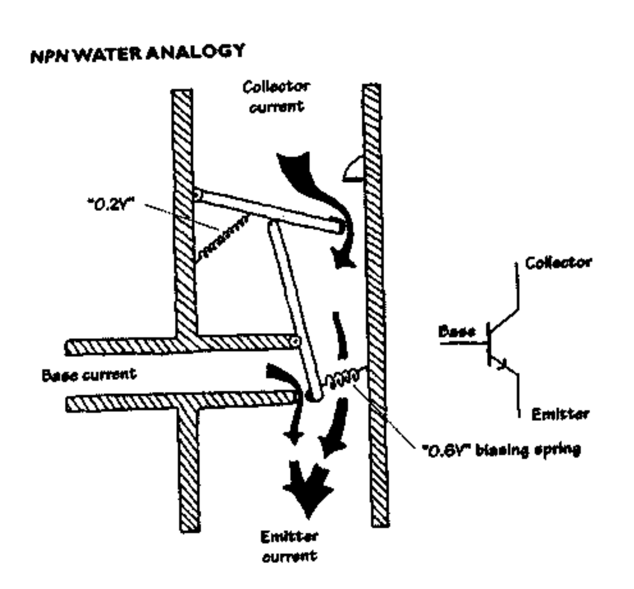
الشكل (26.4): دارة المثال (2).

$$V_E = V_B + 0.6$$
$$V_E = 8.2V + 0.6V = 8.8V$$
$$I_E = \frac{V_{CC} - V_E}{R_1} = \frac{10V - 8.8V}{560\Omega} = 2.1mA$$
$$I_B = \frac{I_E}{(1+h_{FE})} = \frac{2.1mA}{(1+100)} = 0.02mA$$
$$I_C = I_E - I_B \cong I_E = 2.1mA$$
$$V_C = 0 + I_C R_2 = 0V + (2.1mA)(2800\Omega) = 5.9V$$

التشابه بين الترانزستور ثنائي القطبية ونموذج مائي

التشابه بين ترانزستور NPN ونموذج مائي

في الشكل (27.4) يُعطى نموذج مائي يشابه عمل الترانزستور npn. تمثل قاعدة الترانزستور الأنبوب الصغير في النموذج المائي الذي يدخل إلى الأنبوب الكبير من الجانب اليساري، أما المجمع فيمثل الطرف العلوي من الأنبوب العمودي، أما الباعث فيمثله الطرف السفلي للأنبوب العمودي. في حال عدم مرور تيار في قاعدة الترانزستور (عدم وجود ضغط مائي مطبق على أنبوب القاعدة في النموذج المائي) لا يمر تيار في مجمع الترانزستور (ويبقى ذراع الرافعة السفلية في حالة عمودية وبذلك فإن الطرف العلوي لهذه الرافعة يبقي البوابة العلوية في حالة إغلاق ولا يتدفق ماء من الأعلى إلى الأسفل. إذن هنا الترانزستور في حالة قطع والنموذج المائي لا يمرر التيار من الأعلى إلى الأسفل. عندما يُطبق تيار صغير على قاعدة الترانزستور، فإن تياراً يمر من المجمع إلى القاعدة طبعاً إذا كان هناك جهد مطبق بين الباعث والمجمع وكان هذا الجهد يكفل العمل في المنطقة الفعالة للترانزستور. في النموذج المائي إذا تم تطبيق ضغط مائي عبر الأنبوبة الأفقية فإن الرافعة العمودية تُزاح بعكس عقارب الساعة (بشرط أن يكون ضغط الماء أكبر من قوة إرجاع النابض الموصول مع الطرف السفلي للرافعة العمودية) وبتحرك الرافعة العمودية بعكس عقارب الساعة يمكن أن تتحرك البوابة العلوية وتُفتح بقدر معيَّن يتعلق بمقدار انزياح ذراع الرافعة العمودية. في هذه الحالة يتدفق الماء من الأعلى إلى الأسفل وذلك إذا كان ضغط الماء أكبر من قوة إرجاع النابض التي تبقي البوابة العلوية في حالة إغلاق. قوة إغلاق النابض السفلي تماثل الجهد (0.6V) الذي يجب تطبيقه بين القاعدة والباعث كي يمر التيار بين الباعث والمجمع. لاحظ في النموذج المائي أن تيار القاعدة يُضاف إلى تيار المجمع ليشكل التياران مع بعضهما تيار الباعث.

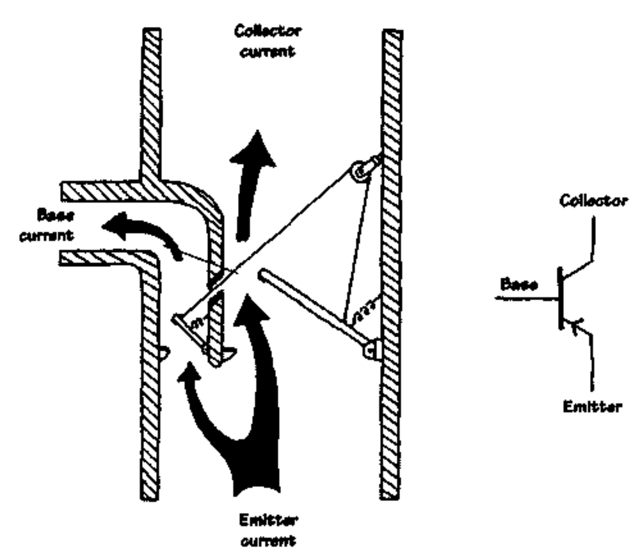


الشكل (27.4): نموذج مائي لعمل الترانزستور npn.

التشابه بين ترانزستور PNP ونموذج مائي

الميزة الأساسية التي يجب ملاحظتها هنا هي الحاجة لوجود ضغط مائي قادم من الأسفل بحيث يمر تيار مائي خارجاً من القاعدة كي يتدفق تيار مائي من الأسفل (تيار باعث) إلى الأعلى (تيار مجمع). عند مرور تيار خارجاً من القاعدة، فإن الرافعة تتحرك وتسمح بفتح الباب بين الباعث والمجمع. تختلف درجة الفتح حسب مقدار انزياح ذراع الرافعة والذي يتعلق بمقدار التيار الخارج من القاعدة. هنا أيضاً لاحظ أن ضغط الماء المتدفق عبر القاعدة يتغلب على تأثير قوة إرجاع النابض التي تبقي البوابة في طرف القاعدة مغلقة عند عدم وجود ماء متدفق، وقوة إرجاع هذا النابض تماثل عمل جهد الاستقطاب (0.6V) بين القاعدة والباعث.





تابع الشكل (27.4): نموذج مائي لعمل الترانزستور pnp.

بعض الاستخدامات الأساسية

مفتاح ترانزستوري

يبيِّن الشكل (29.4) دارات مفاتيح ترانزستورية، الأولى نوع npn والثانية نوع pnp، وفي الدارة الأولى يستخدم ترانزستور npn للتحكم بالتيار المار عبر مصباح إضاءة (light bulb). عند وضع المفتاح على الوضعية (on)، فإن الترانزستور يستقطب بشكلٍ مناسب ويمر تيار من مصدر الجهد (+Vcc) عبر المصباح والمجمع إلى الباعث والأرض. يتحدد تيار القاعدة من العلاقة:

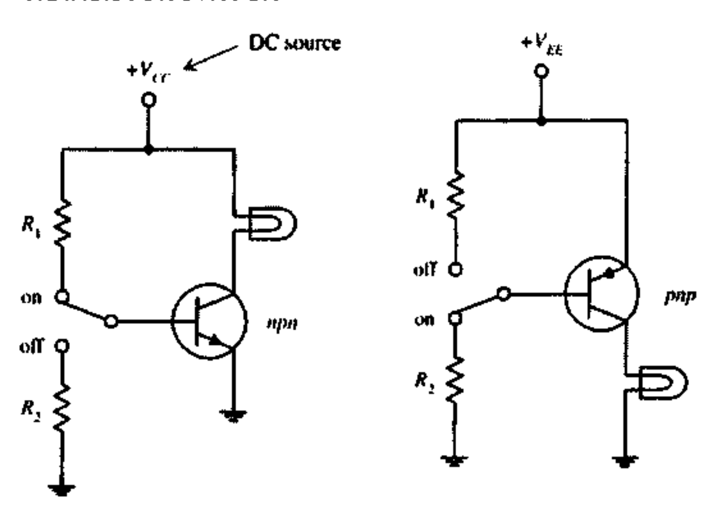
$$I_B = \frac{V_{CC} - 0.6V}{R_1}$$

يمكن معرفة تيار القاعدة من العلاقة:

$$I_C = h_{FE} \cdot I_B$$

وذلك بشرط أن لا يكون هبوط الجهد على المصباح كبيراً. إذاً يجب أن يبقى جهد المجمع (VC) أكبر من جهد القاعدة، أي أكبر من (0.6V) في هذه الدارة.

عند وضع المفتاح على وضعية (off) فإن القاعدة توصل عبر (R2) إلى الأرض ويكون متصل القاعدة باعث غير مستقطب بالاتجاه الأمامي و$I_C = h_{FE} \cdot I_B = 0 \Rightarrow I_C = 0$ ولا يمر تيار عبر المصباح ولا يُضاء المصباح. في دارة الترانزستور pnp يعكس كل شيء مقارنة مع دارة الترانزستور npn، لأن التيار يجب أن يخرج من القاعدة في الترانزستور pnp كي يمر التيار في مجمع.



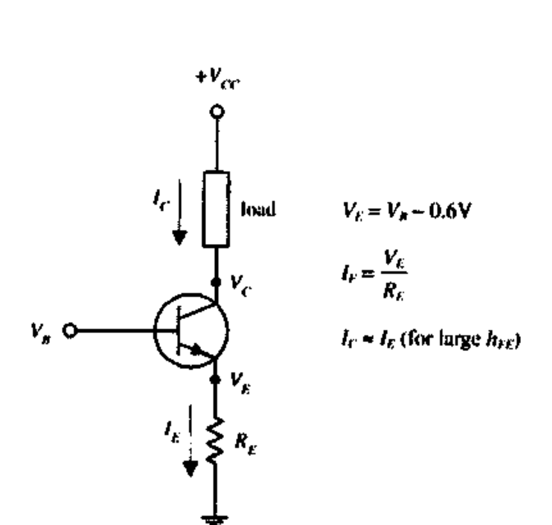
الشكل (28.4): دارات مفاتيح ترانزستورية.

منبع تيار

في دارة الشكل (29.4) تعطى دارة ترانزستور npn يمكن استخدامها كمنبع تيار بسيط. عند تطبيق جهد صغير على طرف القاعدة يمر تيار صغير في القاعدة، فيمر تيار مجمع عبر الحمل والعلاقة بين تيار المجمع وجهد القاعدة هي:

$$I_C \cong I_E = I_{load} = \frac{V_E}{R_E} = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} = \frac{V_B - 0.6V}{R_E}$$

وبذلك يمكن التحكم بهذا التيار عن طريق الجهد V_B.



الشكل (29.4): منبع تيار ترانزستوري.

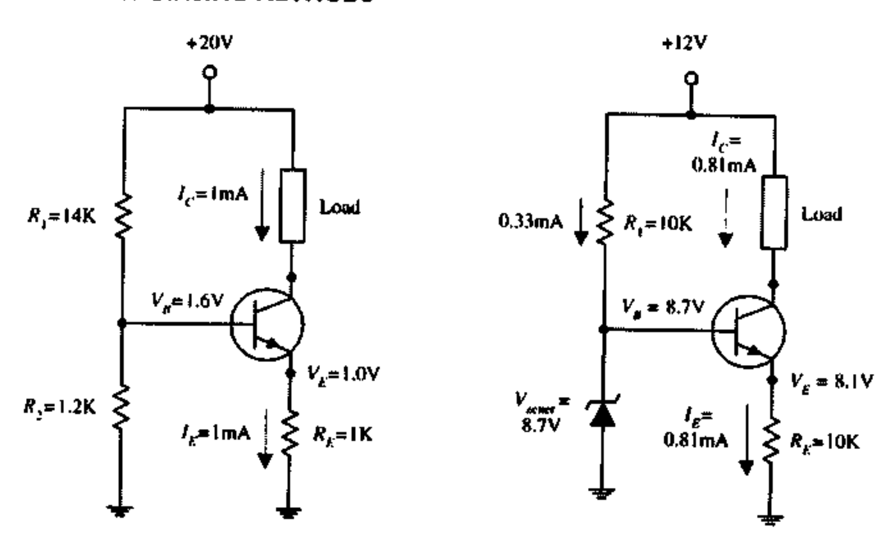
طرق الاستقطاب التيارية

توجد طريقتان شائعتان من أجل تأمين استقطاب منبع التيار، فإما أن يُستخدم مقسم جهد كما في الشكل (30.4 اليساري). أو يستخدم منظم جهد زينري (Zener diode regulator) كما في الدارة اليمينية من الشكل (30.4). في دارة مقسم الجهد يتحدد جهد القاعدة بالمقاومات (R1) و(R2) والجهد Vcc ويُعطى V_B بالمعادلة التالية:

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

أما في دارة المنظم الزينري فإن جهد القاعدة يساوي جهد الزينر:

$$V_B = V_{Zener}$$



الشكل (30.4): طرق استقطاب منبع التيار.

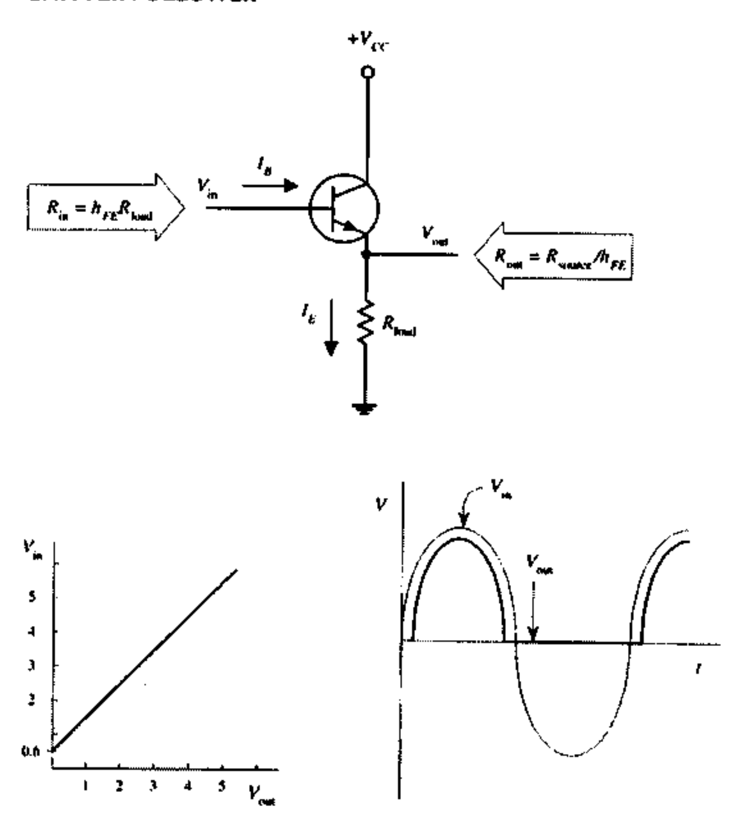
تابع الباعث

تسمى الدارة المبينة في الشكل (31.4) باسم دارة تابع الباعث، وفي هذه الدارة يكون جهد الخرج المأخوذ من مقاومة الباعث صورة عن جهد الدخل (الخرج يتبع الدخل)، وطبعاً سيكون الخرج أصغر من الدخل بمقدار (0.6V)، أي مقدار هبوط الجهد على مُتّصل القاعدة باعث، وبذلك كلما كان $V_B \leq V_E + 0.6V$ أي خلال أنصاف الدور السالب لإشارة الدخل، فإن الترانزستور سوف ينتقل إلى حالة القطع، ويؤدي ذلك إلى قص إشارة الخرج (انظر الشكل).

قد يبدو للوهلة الأولى أن دارة تابع الباعث عديمة الفائدة، لأنها لا تحقق أي ربح جهد، ولكن إذا نظرت للدارة بعمق أكثر تلاحظ أن مقاومة دخلها أكبر بكثير من مقاومة خرجها وبشكلٍ أدق فإن الدارة تعطي تيار خرج (I_E) أكبر بكثير من تيار الدخل (I_B)، وبالتالي فإن تابع الجهد يُعطي ربح تيار عالياً، وهذه الميزة هامة جداً في التطبيقات. كما أن مقاومة الدخل العالية تعني أن الدارة تستهلك القليل من الاستطاعة من إشارة الدخل أي من (Vin) عند استخدام (Vin) لقيادة الحمل بواسطة دارة تابع الجهد وذلك مقارنةً مع الحالة التي يُوصل فيها الحمل مباشرة مع المنبع (Vin). من معادلات ربح الترانزستور وقانون أوم يمكن الحصول على المعادلات التالية لمقاومات الدخل والخرج.

$$R_{in} = h_{FE} R_{load}$$

$$R_{out} = \frac{R_{source}}{h_{FE}}$$



الشكل (31.4): دارة تابع الباعث وعلاقة جهد الخرج بالدخل وأشكال جهود الخرج والدخل.

مضخم تابع الجهد (المجمع المشترك)

تسمى الدارة الموجودة في أعلى الشكل (32.4) باسم دارة مضخم المجمع المشترك، وتمتاز هذه الدارة بأنها تعطي ربح تيار، ولكنها لا تعطي ربح جهد، وفي هذه الدارة نلاحظ استخدام دارة التابع الجهدي بعد إضافة مقسم جهد إليها في طرف القاعدة من أجل التخلص من قص أنصاف الدور السالب لجهد الدخل، وذلك لأن مقسم الجهد يُعطي للإشارة المتناوبة المطبقة على الدخل بعد عبورها المكثف (C1) يعطيها مستوىً مستمراً (dc level). تستخدم المكثفات C1 وC2 في الدارة كي نتمكن من وصل إشارة الدخل ووصل الحمل مع الدارة دون أن يؤثر الحمل ولا مصدر الإشارة على نقطة عمل الدارة (operating point) وتعمل المكثفات كما ترى كعناصر ترشيح (filtering elements). من أجل تصميم دارة مضخم مجمع مشترك تقود حملاً مقاومته ($3k\Omega$) وتستخدم ترانزستوراً له ($h_{FE} = 100$) وتُغذى من جهد $V_{CC} = +10V$ وتحقق $f_{3dB} = 100\ Hz$ عليك اتباع الخطوات التالية:

1. اختر التيار الساكن لنقطة العمل:

$$I_Q = I_C$$

وفي هذه المسألة اختر:

$$I_C = 1mA$$

2. اختر:

$$V_E = \frac{1}{2} V_{CC}$$

وذلك كي تحصل في الخرج على جهد ذي تأرجح أعظمي دون قص، وفي هذه الدارة وبما أن $V_{CC} = +10V$ عليك اختيار $(V_E = +5V)$.

وكي تحصل على $I_C \cong I_E = 1mA$ عليك حساب R_E وفق قانون أوم من العلاقة:

$$R_E = \frac{V_E}{I_Q} = \frac{5V}{1mA} = 5k\Omega$$

3. اختر V_B بحيث تحقق العلاقة:

$$V_B = 0.6 + V_E = 0.6 + 5 = 5.6V$$

ومن أجل تأمين جهد القاعدة المطلوب تستخدم المقاومات R1 وR2 التي تشكل مقسم جهد. يتم تحديد النسبة $(\frac{R_2}{R_1})$ من علاقة مقسم الجهد:

$$V_B = \frac{V_{CC}R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow \frac{1}{V_B} = \frac{R_1 + R_2}{R_2 V_{CC}} = \frac{1}{V_{CC}}(1 + \frac{R_1}{R_2}) \Rightarrow$$

$$\frac{V_{CC}}{V_B} = 1 + \frac{R_1}{R_2}; \frac{R_1}{R_2} = \frac{V_{CC}}{V_B} - 1 = \frac{V_{CC} - V_B}{V_B} \Rightarrow$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_B}{V_{CC} - V_B}$$

عوِّض $V_B = V_E + 0.6$ فتحصل على

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_E + 0.6V}{V_{CC} - (V_E + 0.6V)} = \frac{V_E + 0.6V}{V_{CC} - V_{EE} - 0.6V}$$

في مثالنا هذا نحصل على $\frac{R_2}{R_1} = \frac{5.6}{4.4}$

ومن ذلك تلاحظ أنه يمكنك تقريبا اعتبار $R1 = R2$. يجب أن تكون المقاومة المكافئة لمحصلة (R1) على التوازي مع (R2) أصغر أو تساوي عُشر (1/10) مقاومة الدخل الساكنة والتي يُرمز لها بالرمز $R_{in(base)dc}$

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \le \frac{1}{10} Rin_{(base)dc}$$

$$Rin_{(base)dc} = h_{FE}.R_E = (100)(5k\Omega) = 500k\Omega$$

$$R_1 = R_2 \Rightarrow \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{2}R_1 = \frac{1}{2}R_2 \Rightarrow$$

$$\frac{1}{2}R_1 \le \frac{1}{10}(500k\Omega) \Rightarrow \frac{1}{2}R_1 \le 50k\Omega \Rightarrow$$

$$R_1 \le 100k\Omega$$

ولذلك نختار (R1) تساوي (R2) تساوي (100kΩ). طبعاً لا تؤثر المقاومة R_{load} على مقسم الجهد لأن المكثف (C2) يمنع مرور التيارات المستمرة إلى الحمل.

4. اختر مكثفات الربط المتناوب بحيث تمنع مرور التيارات المستمرة والترددات غير المرغوبة. تشكل (C1) مع المقاومة (R_{in}) مرشح تمرير عالٍ ومن أجل معرفة مقاومة الدخل R_{in} اعتبر أن R1 وR2 و$R_{in(base)ac}$ على التوازي.

$$\frac{1}{R_{in}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{in(base)ac}}$$

لاحظ هنا استخدام $R_{in(base)ac}$ وليس $R_{in(base)dc}$ وذلك لأنك لا تستطيع اعتبار الحمل وكأنه غير موجود بالنسبة للإشارات المتناوبة.

$$R_{in(base)ac} = \frac{R_E.R_{load}}{R_E + R_{load}}.h_{FE}$$

$$=\frac{(500k\Omega)(3k\Omega)}{500k\Omega+3k\Omega}.100=190k\Omega$$

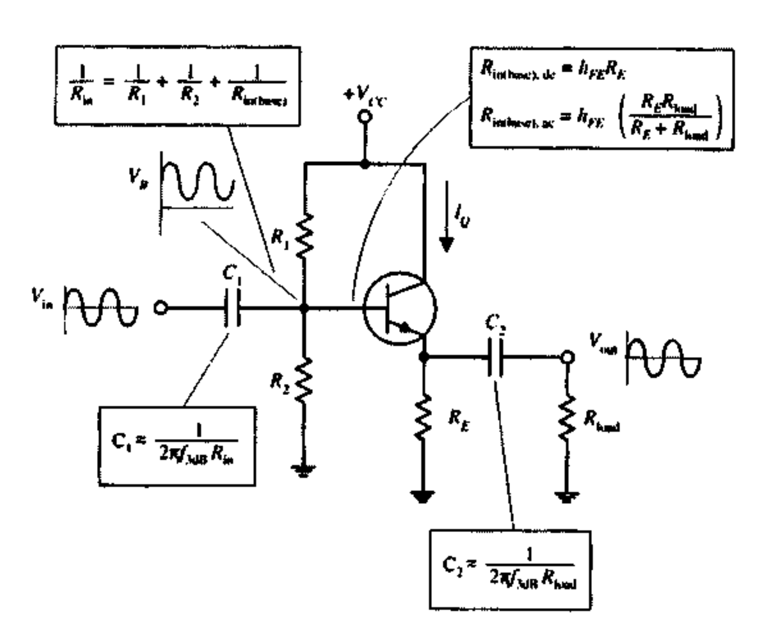
$$\frac{1}{R_{in}}=\frac{1}{100k\Omega}+\frac{1}{100k\Omega}+\frac{1}{190k\Omega}\Rightarrow R_{in}=40k\Omega$$

بعد معرفة R_{in} يمكن حساب السعة (C1) كي يتحقق التردد (f_{3dB}).

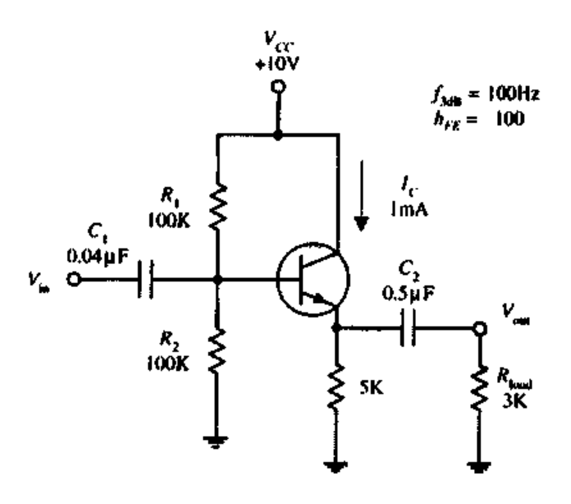
$$C_1=\frac{1}{2\pi(f_{3dB})(R_{in})}=\frac{1}{2\pi(100Hz)(40k\Omega)}=0.04\mu F$$

وكذلك فإن C2 تشكل مع مقاومة الحمل مرشح تمرير عالٍ وتُحسب من العلاقة التالية:

$$C_2=\frac{1}{2\pi(f_{3dB})R_{load}}=\frac{1}{2\pi(100Hz)(3k\Omega)}=0.5\mu F$$



EXAMPLE



الشكل (32.4): دارة مضخم مجمع مشترك.

توصيلة الباعث المشترك

تسمى توصيلة الترانزستور المبينة في الشكل (33.4) باسم توصيلة الباعث المشترك، وهذه التوصيلة تعطي ربح جهد وذلك بعكس توصيلة المجمع المشترك. ولفهم مبدأ عمل هذه الدارة نشير في البداية إلى أنه يتم تصميم الدارة بحيث يكون $V_C = \frac{1}{2}V_{CC}$ كي يتم الحصول على أعظم تأرجح لإشارة الخرج بدون قص، وكما هي الحال في دارة التابع الباعث يتم اختيار تيار ساكن (I_Q) و(I_Q) هو التيار الذي يمر في دارة المجمع عند عدم تطبيق إشارة متناوبة على دخل الدارة. تحسب المقاومة (R_C) من العلاقة:

$$R_C = \frac{V_{CC} - \frac{1}{2}V_{CC}}{I_Q} = \frac{\frac{1}{2}V_{CC}}{I_Q}$$

مثلاً إذا كان $V_{CC} = 10V$ و$I_Q = 0.5mA$ فإن:

$R_C = 10k\Omega$

تُضاف إلى الدارة المقاومة (R_E) بين الباعث والأرض من أجل الاستقرار الحراري.

يتم إيجاد الربح في هذه الدارة بجعل $\Delta V_E = \Delta V_B$ حيث تشير (Δ) هنا إلى تأرجح طفيف. يتم إيجاد تيار الباعث وفقاً لقانون أوم.

$$\Delta I_E = \frac{\Delta V_E}{R_E} = \frac{\Delta V_B}{R_E} \cong \Delta I_C$$

ولكن:

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C \Rightarrow$$
$$\Delta V_C = -\Delta I_C R_C$$

وبما أن $V_C = V_{out}$ و$V_B = V_{in}$ عندها يكون:

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\Delta V_C}{\Delta V_B} = \frac{-\Delta I_C R_C}{\Delta I_C R_E} = -\frac{R_C}{R_E}$$

الشكل (33.4): توصيلة الترانزستور كباعث مشترك.

هذه المعادلة هي معادلة ربح الجهد للدارة الموجودة وسط الشكل (33.4). ومن أجل الحصول على ربح عالٍ وتحقيق استقرار حراري جيد يُوصل مكثف على التوازي مع (R_E) بحيث تكون ممانعة المكثف مهملة بالنسبة لتردد الإشارة المتناوبة المطبقة على الدخل. في هذه الحالة فإن المكثف يقصر المقاومة R_E وإذا عدنا إلى معادلة الربح الأخيرة نجد أن ($R_E = 0$) والربح = ∞.

لكن وكما نعلم فإن لكل ترانزستور مقاومة داخلية صغيرة (small internal resistance):

$$r_{tr} = \frac{0.026v}{I_E}$$

وبتعويض القيم العددية لهذا المثال في هذه العلاقة نجد:

$$r_{tr} = \frac{0.026v}{(0.5)\times 10^{-3}} = 52\Omega$$

وبذلك يكون الربح الفعلي في هذه الحالة:

$$Gain = -\frac{R_C}{R_E} = -\frac{R_C}{r_{tr}} = -\frac{10k\Omega}{52\Omega} = -192$$

لاحظ إشارة الناقص في قيمة الربح. تدل هذه الإشارة على أن الخرج معكوس، أي يعاكس الدخل بالصفحة وهذا في الواقع ناتج عن أن زيادة (V_{in}) تؤدي إلى زيادة (I_C) مما يؤدي إلى نقصان (V_C) أي نقصان جهد الخرج.

تتعلق (r_{tr}) بدرجة الحرارة ولذلك فإن ربح المضخم يتعلق بدرجة الحرارة. فعندما ترتفع درجة الحرارة فإن (V_E) يرتفع ويرتفع التيار (I_C)، ولكن (V_{BE}) ينخفض، أما (V_B) فيبقى ثابتاً وهذا يعني أن الاستقطاب الأمامي لمتصل قاعدة-باعث ينخفض وبذلك فإن الترانزستور يقترب من القطع. لإزالة هذه السلبيّة توصل المقاومة (R_E) بين الباعث والأرض. وباعتبار (R_E) و(r_{tr}) على التسلسل فإن الربح يكون:

$$Gain = -\frac{R_C}{R_E + r_{tr}}$$

وذلك إذا كان المكثف بين طرفي (R_E) غير موجود. بإضافة (R_E) تنخفض التغيرات في مقام معادلة الربح وتنخفض تغيرات الربح. يتم اختيار R_E بحيث يكون (V_E) تقريباً $(1V)$ وذلك من أجل الاستقرار الحراري ومن أجل التأرجح الأعظمي لجهد الخرج. وفقاً لقانون أوم وحسب معطيات المثال:

$$R_E = \frac{V_E}{I_E} = \frac{V_E}{I_Q} = \frac{1V}{1mA} = 1k\Omega$$

هناك سلبية تنتج عن إضافة (R_E) إلى الدارة وهي انخفاض الربح ويمكن تلافي هذه السلبية كما ذكرنا بوصل مكثف على التوازي مع (R_E)، لأن المكثف يقصر المقاومة (R_E) بالنسبة للإشارة المتناوبة وتختفي (R_E) من معادلة الربح.

تذكر أن ممانعة المكثف للتيار المستمر تنتهي إلى اللانهاية، أما ممانعته للتيار المتناوب فتتعلق بتردد التيار وبسعة المكثف ويمكن اختيار سعة هذا المكثف بحيث تكون ممانعته للتيار المتناوب قريبة من الصفر، فيمر التيار المتناوب عبره وليس عبر (R_E) ولذلك يُسمى المكثف الذي يُوصل على التوازي مع (R_E) كما في الشكل (33.4) في الأسفل باسم مكثف تمرير جانبي (bypass capacitor).

مضخم باعث مشترك

تسمى الدارة المبينة في أعلى الشكل (34.4) باسم دارة مضخم بوصلة باعث مشترك وتمتاز دارة مضخم الباعث المشترك بربح الجهد العالي. لاحظ أن هذه الدارة تشبه دارة توصيلة الباعث المشترك ولكن أضيف لها مقسم جهد في طرف القاعدة ومكثفات ربط متناوب للحمل ولمصدر الإشارة. لفهم آلية عمل هذه الدارة نحل المثال التالي:

صمم مضخم بوصلة باعث مشترك يُعطي ربح جهد يساوي (100-) ويحقق $(f_{3dB} = 100Hz)$ وتيار $I_Q = 1mA$. اعتبر أن $V_{CC} = 20V$ وأن $h_{FE} = 100$.

الحل:

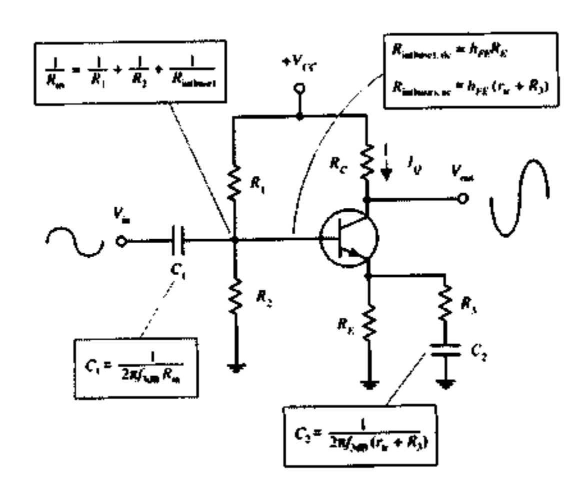
1) اختر V_C بحيث تساوي $0.5\ V_{CC}$، وذلك كي تحصل على أعظم تأرجح دون قص لإشارة الخرج.

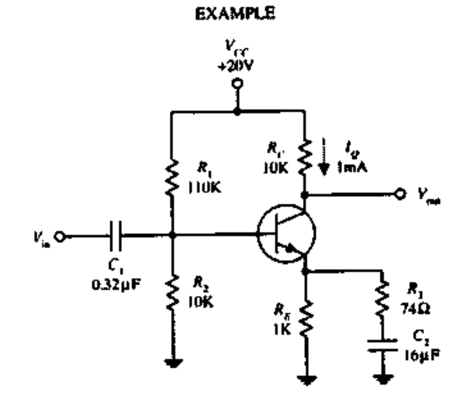
$$V_C = \frac{1}{2}V_{CC} = \frac{1}{2}(20) = 10V$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_C}{I_Q} = \frac{20V - 10V}{(1mA)} = 10k\Omega$$

2) اختر (R_E) بحيث يكون $V_E = 1V$:

$$I_C \cong I_E = I_Q = R_E = \frac{V_E}{I_Q} = \frac{1V}{1mA} = 1k\Omega$$





الشكل (34.4): دارة مضخم بوصلة باعث مشترك.

3) اختر R1 وR2 بحيث تجعل (V_B) مساوياً للقيمة المحسوبة من العلاقة:

$$V_B = V_E + 0.6 = 1 + 0.6 = 1.6V$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_B}{V_{CC} - V_B} = \frac{1.6}{20 - 1.6} = \frac{1}{11.5} \Rightarrow$$

من أجل حساب (R1) و(R2) نستخدم نفس الفكرة الواردة في دارة المجمع المشترك:

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \leq \frac{1}{10} R_{in(base)dc}$$

بتعويض R1 = (11.5) R2 في هذه المعادلة وباعتبار $R_{in(base)dc} = h_{FE}.R_E$ تحصل على R2 = 10kΩ وبذلك تكون R1 = 115kΩ (يمكن اعتبار R1 = 110kΩ).

4) استخدم المقاومة (R3) كي تحقق الربح المطلوب:

$$Gain = -\frac{R_C}{R_E \,||\, (r_{tr} + R_3)} = -100$$

الخطان المتوازيان (//) يعنيان أن (R_E) موصولة على التوازي مع ($r_{tr} + R_3$).

يمكن حساب (r_{tr}) من العلاقة:

$$r_{tr} = \frac{0.026V}{I_E} = \frac{0.026V}{1mA} = 26\Omega$$

الآن يمكنك إيجاد الربح، ولكن بإمكانك اعتبار (R_E) مقصورة عند تطبيق إشارة متناوبة، إذن تصبح معادلة الربح كما يلي:

$$Gain = -\frac{R_C}{R_3 + r_{tr}} = -\frac{10k\Omega}{26\Omega + R_3} = -100$$

ومنها تحصل على:

R3 = 74Ω

5) احسب قيمة C1 التي تحقق الترشيح المطلوب:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi (f_{3dB}) R_{in}}$$

R_{in}: هي مقاومة الدخل المتناوبة للمضخم:

$$\frac{1}{R_{in}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{h_{FE}(r_{tr} + R_3)}$$

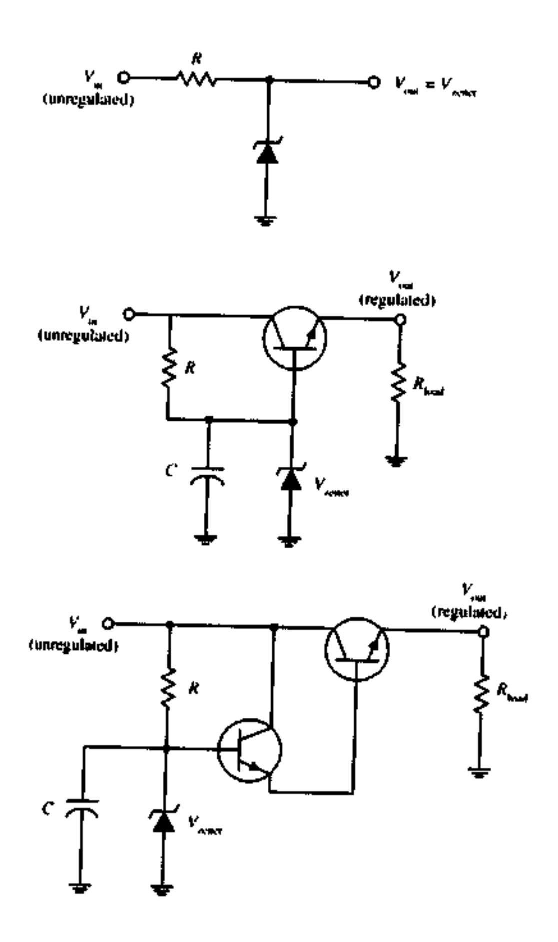
$$= \frac{1}{110k} + \frac{1}{10k} + \frac{1}{100(26\Omega + 74\Omega)} \Rightarrow$$

$$R_{in} = 5k\Omega; C_1 = \frac{1}{2\pi (100Hz)(5k\Omega)} = 0.32\mu F$$

6) لحساب C2 اعتبر أن C2 تشكل مع ($r_{tr} + R_3$) مرشح تمرير عالٍ:

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_{3dB}(r_{tr} + R_3)} = \frac{1}{2\pi (100Hz)(26\Omega + 74\Omega)} = 16\mu F$$

منظم الجهد

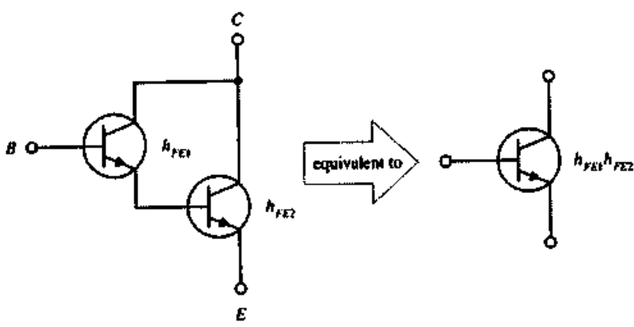


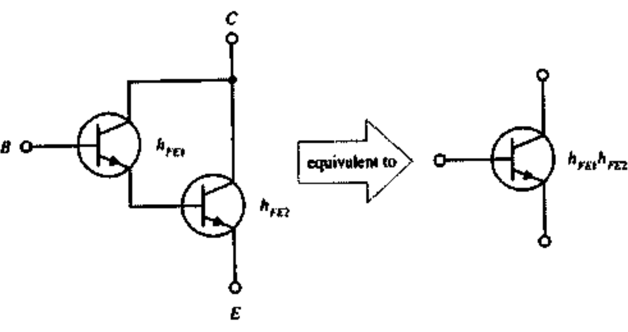
الشكل (35.4): دارات منظمات جهد.

يمكن استخدام ديود الزينر (Zener diode) لتشكيل منظم جهد بسيط (انظر الشكل 35.4)، ولكن دارة منظم الزينر لها الكثير من السلبيات التي تجعلها غير مناسبة في الكثير من التطبيقات؛ فجهد خرج منظم الزينر (Vout) غير قابل للضبط على قيم دقيقة، إضافة إلى أن ديود الزينر يؤمن حماية معتدلة من تعرجات (تموجات الجهد)، كما أن منظم الزينر لا يعمل بشكلٍ جيد وخاصة عندما تتغير مقاومة الحمل، كما أن تغيرات الحِمل الكبيرة تتطلب استخدام ديود زينر عالي الاستطاعة وبالتالي غالي الثمن. تقوم الدارة الثانية في الشكل (35.4) بعمل أفضل من الدارة الأولى حيث تؤمن التنظيم حتى لو تغير الحمل كما تُعطي تيار خرج عالٍ وهي أيضاً أكثر استقرارية. دارة المنظم الثانية تذكرك بالدارة الأولى ولاحظ في الدارة الثانية أن الزينر موصول مع قاعدة ترانزستور npn والترانزستور يعمل بوصلة تابع الباعث وهذا يعني أن جهد الخرج يساوي تقريباً جهد الدخل (طبعاً الخرج أصغر من الدخل بـ 0.6V)، واستخدام ديود زينر لتنظيم جهد قاعدة الترانزستور يؤدي بالضرورة إلى تنظيم جهد الخرج. التيار الذي يمكن تزويده إلى الحمل هو (I_E) وحسب قواعد وعلاقات التيارات في الترانزستور فإن تيار قاعدة الترانزستور يساوي ($\frac{I_E}{h_{FE}}$)، ولذلك يكفي ديود زينر قليل الاستطاعة لتنظيم جهد قاعدة الترانزستور الذي يُعطي تياراً لا بأس به إلى الحمل. المكثف الموصول على التوازي مع الزينر يخفض الضجيج عن الزينر ويشكل مرشح (Rc) مع المقاومة وبذلك فإنه يُخفض تعرجات أو تموجات الجهد على الزينر. في بعض الحالات لا تكون دارة الزينر والترانزستور قادرة على تأمين تيار الحمل المطلوب ويمكن لحل هذه المشكلة إضافة ترانزستور آخر إلى الدارة كما في الشكل السفلي (35.4). توصل قاعدة الترانزستور الأول مع مهبط الزينر أما باعث الترانزستور الأول فيوصل مع قاعدة الترانزستور الثاني ومجمع الترانزستور الثاني يُوصل مع مجمع الترانزستور الأول، وبذلك فإن الترانزستور الأول يعمل كمكبر أولي للتيار وتيار خرجه (تيار باعثه) يُطبق على قاعدة الترانزستور الثاني.

زوج ترانزستورات دارلنغتون

عند وصل ترانزستورين مع بعض كما في الشكل (36.4) نحصل على ترانزستور مكافئ ذي h_{FE} عالٍ جداً. تسمى توصيلة الترانزستورات بهذا الشكل باسم توصيلة دارلنغتون. h_{FE} المكافئ يساوي ($h_{FE1} \times h_{FE2}$). تستخدَم توصيلة دارلنغتون للتطبيقات عالية التيار، وكمرحلة دخل للمضخمات وخاصة عندما يُطلب تحقيق ممانعة دخل عالية جداً. زمن استجابة توصيلة دارلنغتون أكبر من زمن استجابة الترانزستور المفرد، وهبوط الجهد بين قاعدة الترانزستور الأول وباعث الترانزستور الثاني تساوي 1.2V. تباع أزواج ترانزستورات دارلنغتون جاهزة ضمن غلافٍ واحد.

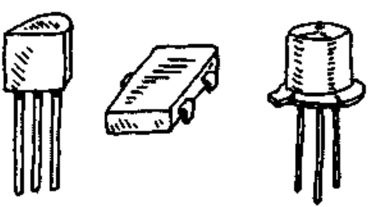




الشكل (36.4): زوج ترانزستورات دارلنغتون.

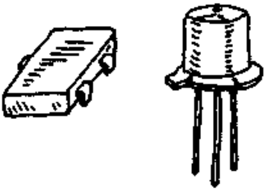
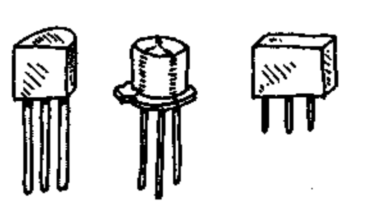
نماذج الترانزستورات ثنائية القطبية

ترانزستورات الإشارات الصغيرة



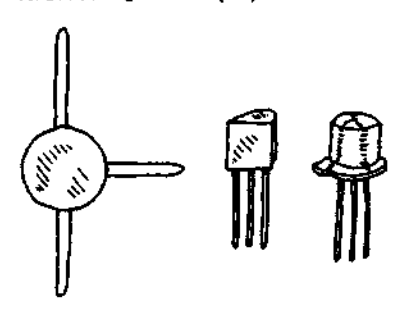
تستخدم هذه الترانزستورات لتضخيم الإشارات منخفضة المستوى. تتراوح قيم (hFE) لهذه الترانزستورات بين (10) و(500). أما قيم التيار الأعظمي (Ic) المسموح في هذه الترانزستورات فتتراوح بين (80) و(600mA)، وتتوفر هذه الترانزستورات بأنواع (npn) أو (pnp)، يتراوح تردد العمل الأعظمي لهذه الترانزستورات بين (1) و300MHz.

ترانزستورات المفاتيح الصغيرة

تستخدم هذه الترانزستور بشكلٍ أساسي كمفاتيح (switchers)، ولكن يمكن استخدامها أيضاً كمضخمات. تتراوح قيم hFE لهذه الترانزستورات بين (10) و(200)، أما تيارات المجمع (Ic) فتقع في المجال من (10) إلى (1000mA) وتتوفر بأنواع (npn) و(pnp). يتراوح مجال معدَّل الفتح والإغلاق بين (10) و2000MHz.

ترانزستورات الترددات العالية



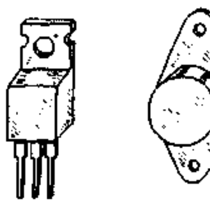
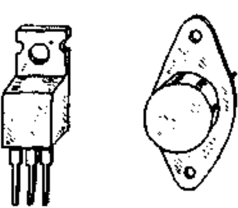
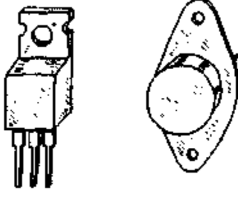
الشكل (37.4): نماذج الترانزستورات ثنائية القطبيّة.

تستخدم هذه الترانزستورات لتضخيم الإشارات عالية التردد منخفضة المستوى أو تستخدم أيضاً كمفاتيح عالية السرعة. قاعدة هذه الترانزستورات رقيقة جداً وشريحة هذه الترانزستورات صغيرة جداً. تستخدم ترانزستورات الترددات العالية كمضخمات وهزازات (oscillators) للترددات HF (الترددات العالية)، VHF (الترددات العالية جداً)، UHF (الترددات فوق العالية) وCATV وMATV.

تردد العمل الأعظمي لهذه الترانزستورات يصل حتى (2000MHz)، أما تيارات مجمعات هذه الترانزستورات فتتراوح بين (10) و(600mA)، وتتوفر بنوعي (npn) و(pnp).

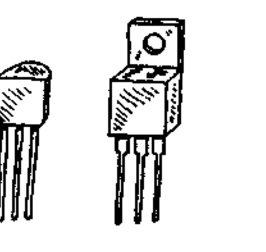
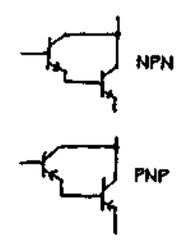
الترانزستورات الاستطاعية

هي نوع خاص من الترانزستورات التي يتم استخدامها في المضخمات عالية الاستطاعة (المضخمات الاستطاعية power amplifiers) وفي مصادر التغذية. يوصل مجمع هذه الترانزستورات عادة مع غلافها الذي يكون معدنياً ويعمل الغلاف كمبدِّد للحرارة (heat sink). تتراوح استطاعات هذه الترانزستورات بين (10) و(300W) أما ترددات العمل فتقع في المجال من (1) وحتى (100MHz). تيارات المجمعات تكون عادة عالية نسبياً وتتراوح بين (1) و(100A). تتوفر بنوعي (npn) و(pnp).

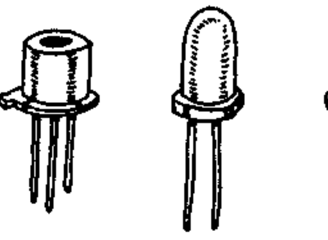
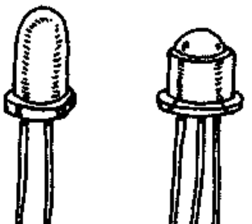
أزواج ترانزستورات دارلنغتون

وهي عبارة عن ترانزستورين بغلاف واحد وفقط بثلاث أطراف ظاهرة إلى العالم الخارجي، وتمتاز بربح تيار عالٍ وباستقرارية عالية. القيمة الفعالة لـ h_{FE} لزوج دارلنغتون أكبر بكثير من (h_{FE}) لترانزستور واحد مفرد ولذلك تعطي ربح تيار عالياً. تتوفر بنوع npn ويرمز لها (D-npn) وبنوع pnp ويُرمز لها بالرمز (D-pnp).

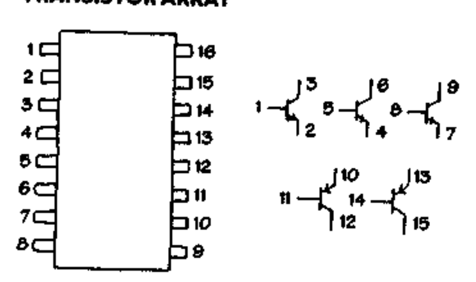
الترانزستورات الضوئية

تعمل هذه الترانزستورات كترانزستورات ثنائية القطبيّة حساسة للضوء (تُعرَّض القاعدة للضوء). عندما يسقط الضوء على منطقة القاعدة يمر تيار في القاعدة، وحسب نوع الترانزستور الضوئي، فإن الضوء يمكن أن يكون هو المسبب الأساسي للاستقطاب (وذلك في الترانزستورات الضوئية التي لها طرفان فقط)، أو يمكن أن يكون مساعداً في الاستقطاب (أي يغيِّر تيار قاعدة ناتج عن مقاومات استقطاب خارجية -وذلك في الترانزستورات الضوئية التي لها ثلاثة أطراف). لمزيد من التفصيلات راجع الفصل الخامس.

المصفوفة الترانزستورية (مصفوفة الترانزستورات)

تتكون مصفوفة الترانزستورات من عدد من الترانزستورات الموجودة ضمن دارة متكاملة، كما في مصفوفة الترانزستورات المبينة في الشكل (37.4) والتي تحوي ثلاثة ترانزستورات npn وترانزستورين pnp.

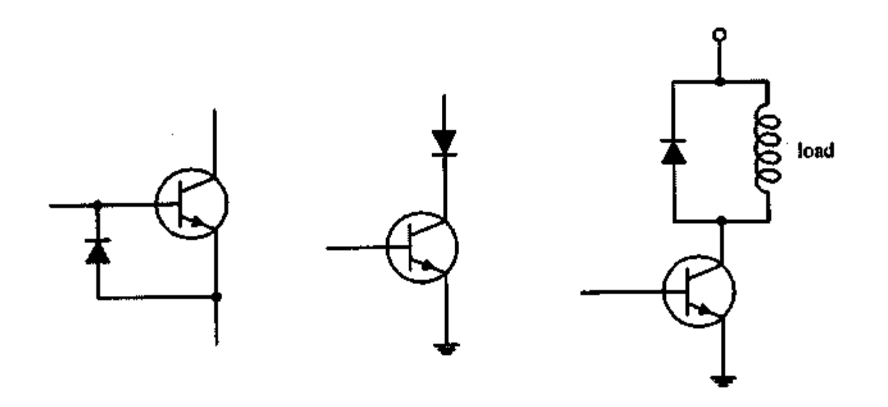


تابع الشكل (37.4): نماذج الترانزستورات ثنائية القطبيّة.

اشياء هامة يجب ان تعرفها عن الترانزستورات ثنائية القطبية

- إن البارامتر (h_{FE}) يمكن أن يتغير لنفس النوع من الترانزستورات بين (50) مثلاً و(500)، وذلك لأن h_{FE} يتغيّر بتغييرات تيار المجمع وكذلك بتغيرات درجة الحرارة. بما أنه لا يمكن التنبؤ بدقة بقيمة h_{FE}، لذلك يُنصح بعدم تصميم دارات تعتمد بشكلٍ خاص على قيمة h_{FE}.
- لكل ترانزستورات معدلات أعظمية، ومن هذه المعدلات الأعظمية:
  - I_{Cmax}: تيار المجمع الأعظمي.
  - BV_{CBO}: الجهد الأعظمي بين المجمع والقاعدة.
  - BV_{CEO}: الجهد الأعظمي بين المجمع والباعث.
  - BV_{EBO}: الجهد الأعظمي بين القاعدة والباعث.
  - P_D: تبديد الاستطاعة الأعظمي على المجمع.

إذا تم تجاوز هذه المعدلات أثناء تشغيل الترانزستور، فإن الترانزستور يمكن أن يخرب (يُدَمر). إحدى طرق الحماية من BV_{EB} تتلخص بوصل ديود بين الباعث والقاعدة كما في الشكل (38.4)، ويمنع هذا الديود متصل القاعدة-باعث من النقل عندما يُصبح الباعث أكثر إيجابية من القاعدة ويحدث ذلك إذا كان الباعث مؤرضاً وخلال نصف الدور السالب لإشارة دخل جيبيّة مطبقة على القاعدة. يوصل ديود على التسلسل مع المجمع كما في الشكل (38.4) للحماية من تجاوز BV_{CBO}، وقد يحدث نقل عبر متصل القاعدة -مجمع في ترانزستور (والذي يكون عادة مستقطباً عكسياً في المضخمات)، إذا أصبح جهد القاعدة أعلى من جهد المجمع. للتأكد من عدم تجاوز BV_{CEO}، والذي قد يحدث إذا كان حمل الترانزستور تحريضياً يوصل ديود على التوازي مع الحمل التحريضي كما في الشكل (38.4)، وفي هذه الدارة ينتقل الديود إلى حالة (on) أي إلى التمرير قبل أن تصل قفزات الجهد على المجمع إلى قيمة عالية تساوي جهد الانهيار.



الشكل (38.4): حماية الترانزستور من جهود الانهيار.

ارجل الترانزستورات ثنائية القطبية

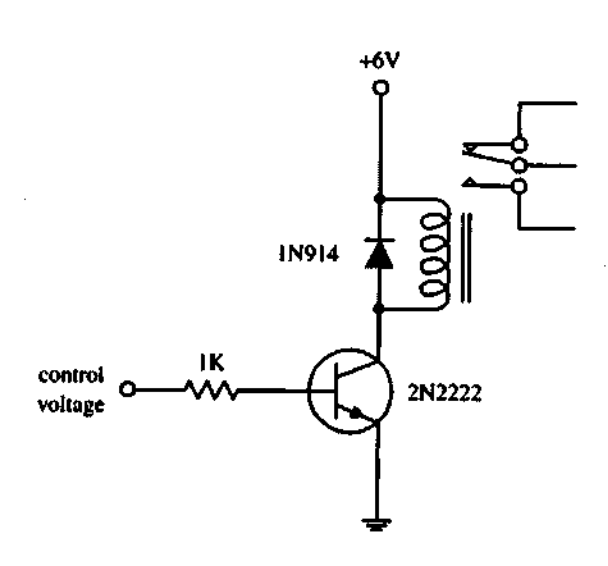
تتوفر الترانزستورات ثنائية القطبية بأنواع مختلفة من الأغلفة. بعض الترانزستورات ذات غلاف بلاستيكي وبعضها الآخر لها غلاف معدني، وعند استخدام الترانزستور لا بد من معرفة أرجل الترانزستور، القاعدة (Base) والمجمع (Collector) والباعث (emitter) ومن أجل ذلك عليك البحث أولاً عن مخطط توزع الأرجل لنوع الغلاف المتوفر لديك، فإذا لم يتوفر مثل هذا المخطط عليك البحث عن كتالوك ترانزستورات مثل NTE Cross-Reference Catalog for Semiconductors.

ولكن وفي أغلب الترانزستورات التي تستخدم كمفاتيح لا يمكن البحث عن توضع أرجلها في الكتالوكات لأنه لا توجد عليها كتابات تدل على نوعها، وغالباً ما تنتج الشركات التي تطرح هذه الترانزستورات مجموعات كبيرة منها بعضها نوع (npn) والبعض الآخر نوع (pnp) وكلها لها نفس الشكل ولكن توضع الأرجل وتسلسلها يختلف من واحدٍ لآخر. إذا كنت من الناس الذين يستخدمون الترانزستورات بكثرة فإننا ننصحك بشراء مقياس آفومتر رقمي مزوّد بفاحصٍ ترانزستورات (Transistor Tester). وهذه الأجهزة سهلة الاستخدام ورخيصة الكلفة، وغالباً ما يكون هذا الجهاز مزوداً بنماذج مختلفة من قواعد تركيب الترانزستورات، ولاختبار الترانزستور يكفي وضعه على قاعدته وضغط مفتاح اختبار فيدلك الجهاز على نوع الترانزستور (npn) أو (pnp) ويعطيك h_{FE} للترانزستور، كما يدلك على توضع الأقطاب (الأرجل).

تطبيقات

ترانزستور قيادة حاكمة

في الشكل (39.4) يستخدم ترانزستور (npn) للتحكم بعمل حاكمة. عندما يُطبق على قاعدة الترانزستور جهد تحكم (يمر في القاعدة تيار) ينتقل الترانزستور إلى حالة عمل (on) ويمر تيار عبر ملف الحاكمة وتتغيّر وضعيات تماسات الحاكمة. يستخدم الديود للتخلص من قفزات الجهد المفاجئ والتي تنتج عن ملف الحاكمة. طبعاً يجب اختيار حاكمة تُناسب الجهد المطبق على المجمع، كما أن الترانزستور يجب أن يتحمل تيار ملف الحاكمة.



الشكل (39.4): ترانزستور قيادة حاكمة.

مضخم تفاضلي

إن المضخم التفاضلي المبيَّن في الشكل (40.4) يقارن إشارتي الدخل ويكبر الفرق بين الإشارتين ولفهم مبدأ عمل هذا المضخم اعتبر أن الترانزستورات متماثلة، ولاحظ أن الترانزستورين يعملان بوصلة باعث مشترك. عند تطبيق إشارات متماثلة على المداخل (V1) و(V2) تمر تيارات متساوية في الترانزستورين ويكون جهد مجمع كل ترانزستور هو:

$$V_C = V_{CC} - I_C . R_C$$

وطبعاً تكون جهود المجمعين متساوية، وبما أن الجهد مأخوذ بين مجمعي الترانزستورين، فإن جهد الخرج سيكون صفراً.
الآن افرض أن (V1) أكبر من (V2) عندها يكون التيار الذي يمر في الترانزستور اليساري أكبر من التيار الذي يمر في الترانزستور اليميني، وعندها سيكون جهد مجمع الترانزستور اليميني أكبر من جهد مجمع الترانزستور اليساري.
الترانزستورات تعمل بوصلة باعث مشترك ويتم تكبير الفرق بين إشارتي الدخل ويُعطى جهد الخرج بالعلاقة التالية:

$$V_{out} = \frac{R_C}{r_{tr}}(V_1 - V_2)$$

ومن هذه المعادلة تلاحظ أن الربح:

$$Gain = \frac{R_C}{r_{tr}}$$

ولفهم كيفية اختيار قيم مقاومات الدارة سنقوم بشرح الدارة المبينة في الشكل. يتم اختيار (R_C) بحيث يكون ($V_C = \frac{1}{2}V_{CC}$) وفي الدارة المعطاة نختار ($V_C = 5V$) وذلك من أجل جعل المجال الديناميكي أعظمياً. وبنفس الوقت يجب اختيار قيمة لتيار المجمع الساكن (I_Q) أي في حالة عدم تطبيق إشارات متناوبة على الدارة، نفرض أننا اخترنا

$$I_Q = I_C = 50\mu A$$

$$R_C = \frac{10V - 5V}{50\mu A} = 100k\Omega$$

يتم اختيار المقاومة R_E بحيث يكون جهد بواعث الترانزستورات في الدارة تقريباً مساوياً للصفر. وبذلك يمكن حساب المقاومة (R_E) كما يلي:
التيار الذي يمر في R_E هو مجموع تياري باعثي الترانزستور وبسبب تناظر الدارة يكون:

$$2I_E = 2I_Q = 2I_C = 2\times 50\mu A = 100\mu A$$

إذا رمزنا لجهد البواعث بالرمز (V_E) عندها نكتب:

$$V_E = -V_{EE} + 2I_E R_E$$

$$0 = -10 + (100\mu A)R_E \Rightarrow R_E = \frac{10}{100\mu A} = 100k\Omega$$

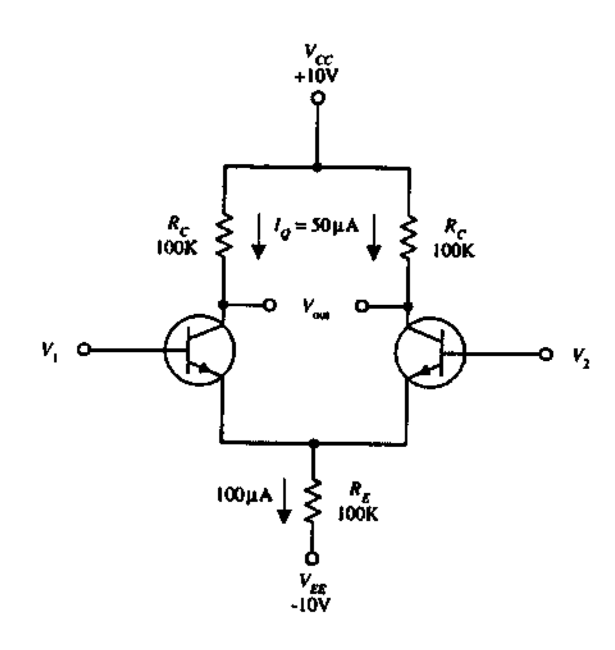
بعد ذلك نوجد (r_{tr}) للترانزستور من العلاقة:

$$r_{tr} = \frac{0.026V}{I_E} = \frac{0.026V}{50\mu A} = 520\Omega$$

وبتعويض هذه القيم في معادلة الربح نحصل على:

$$Gain = \frac{R_C}{r_{tr}} = \frac{100k\Omega}{520\Omega} = 192$$

يستخدم المضخم التفاضلي لاستخلاص الإشارات الضعيفة والتي التقطت الكثير من الضجيج خلال مرورها في خطوط النقل حيث يُوضع المضخم التفاضلي في طرف الاستقبال، وبعكس المرشحات التي يمكن أن تستخلص الإشارة من الضجيج إذا كان تردد الإشارة مختلفاً عن تردد الضجيج، فإن المضخم التفاضلي لا يحتاج إلى تحقق هذا الشرط لفصل الإشارة عن الضجيج، ولكن يفترض أن الضجيج واحد على المدخلين. يُستخدم مصطلح نسبة رفض النمط المشترك (Common Mode Rejection Ratio) كثيراً عند التعامل مع المضخمات التفاضلية ويرمز لهذه النسبة بـــ (CMRR) وهي تعبر عن جودة المضخم التفاضلي والمضخم التفاضلي الجيد له CMRR عالية (نظرياً لا نهاية) ويعبر CMRR عن نسبة الجهد الذي يجب أن يُطبق على المدخلين على التوازي V1 وV2 إلى جهد الفرق (V2 - V1) كي يكون للخرج نفس المطال.



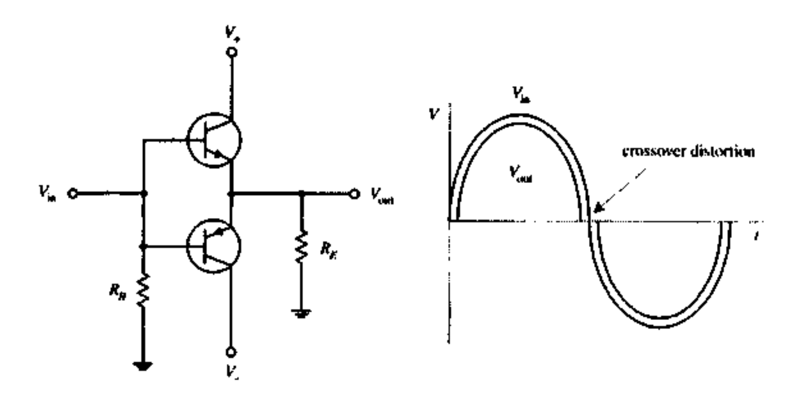
الشكل (40.4): مضخم تفاضلي.

مضخم متناظر يعمل على ترانزستورات متعاكسة القطبية

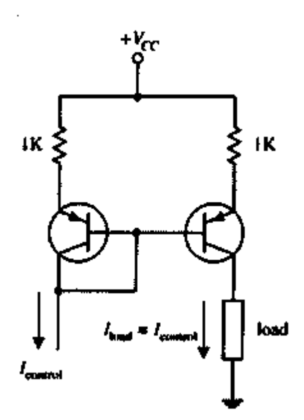
تذكر أن ترانزستور نوع npn بوصلة مجمع مشترك يقص إشارة الدخل خلال أنصاف الدور السالب، لأن الترانزستور ينتقل إلى حالة قطع عندما يكون جهد قاعدته $V_B \leq V_E + 0.6V$. ووفقاً لنفس المبدأ فإن ترانزستور نوع pnp بوصلة مجمع مشترك سوف يقص أنصاف الدور الموجب لإشارة الدخل، ولكن إذا تم وصل ترانزستورين pnp وnpn كما في الشكل (41.4) فإنك تحصل على مضخم يُسمى مضخم دفع-جذب (push-pull amplifier) أو مضخم متناظر يعمل على ترانزستورين متعاكسي القطبيّة، وهذا المضخم يحقق ربح تيار ويمرر خلال دور كامل لإشارة الدخل. عندما يكون ($V_{in} = 0$)، فإن الترانزستورين يكونا في حالة قطع ($I_B = 0$). وعندما يكون $V_{in} > 0$ يكون الترانزستور العلوي في حالة تمرير (conducts)، ويعمل كتابع جهدي، أما الترانزستور السفلي فيكون في حالة قطع (cut off). عندما يكون $V_{in} < 0$ يكون الترانزستور السفلي في حالة تمرير ويعمل أيضاً كدارة تابع جهدي بينما يكون الترانزستور العلوي في حالة قطع. يمكن استخدام هذا المضخم كمضخم ربط مباشر (dc amplifier) وبالإضافة إلى ذلك فهو يوفر الطاقة لأن نقطة عمل كل ترانزستور توافق ($I_C \cong 0$)، ولكن مواصفات (h_{FE}) و(r_{tr}) غير مستقرة عند ($I_C \cong 0$) ولذلك لا تكون الدارة خطية بالنسبة للإشارات صغيرة المطالات، أو عند المستويات القريبة من الصفر (عند المرور بالصفر) بالنسبة للإشارات الكبيرة (Large-Signals) وينشأ ما يسمى بتشويه العبور بالصفر (crossover distortion).

مرآة التيار

في هذه الدارة يُستخدم ترانزستوران متناظران نوع pnp لتشكيل ما يسمى مرآة تيار. وفي هذه الدارة يكون تيار الحمل وكأنه صورة مرآتية لتيار التحكم (control current) والذي يخرج من مجمع الترانزستور اليساري. وبما أن نفس تيارات الاستقطاب تخرج من قواعد هذه الترانزستورات فإن تيارات المجمعات يجب أن تكون متساوية. يمكن ضبط تيار التحكم بواسطة مقاومة توصل بين مجمع الترانزستور اليساري وجهد أخفض. يمكن بناء مرآة التيار أيضاً بواسطة ترانزستورات npn ولكن شكل الدارة سيكون مقلوباً كما أن اتجاهات التيارات تكون معكوسة وتستبدل ترانزستورات الـ pnp بترانزستورات npn ويُبدَّل جهد التغذية بالأرضي والأرضي بجهد التغذية.



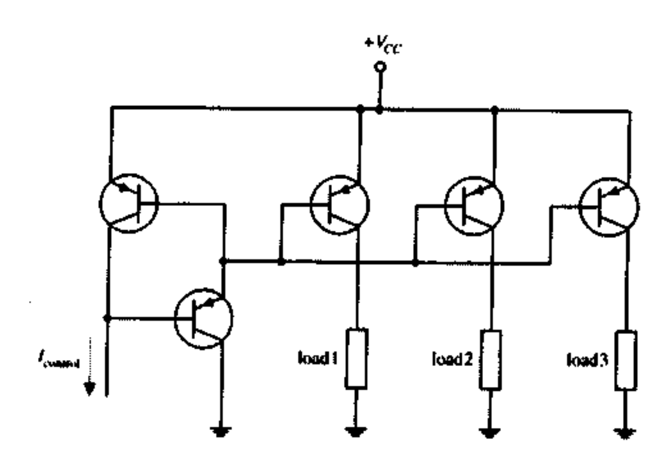
الشكل (41.4): مضخم دفع جذب يعمل على ترانزستورات متعاكسة القطبيّة.



الشكل (42.4): مرآة التيار.

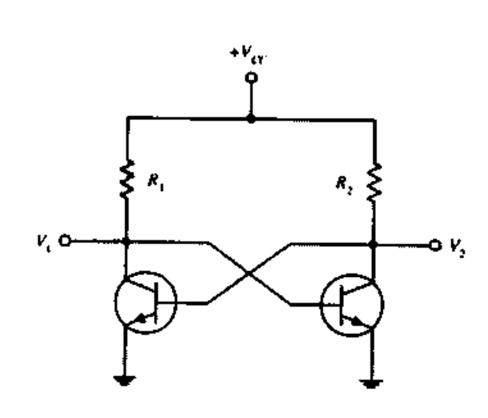
مصادر (منابع) تيار متعددة

الدارة المبينة في هذا الشكل هي توسيع لدارة الشكل السابق وتقوم هذه الدارة بتزويد أحمال مختلفة بنفس التيار الذي يساوي تيار التحكم، ويمكن تصميم هذه الدارة باستخدام ترانزستورات npn، مع الأخذ بالاعتبار ما ذكرناه عن ذلك في الفقرة السابقة. لاحظ إضافة ترانزستور آخر في طرف التحكم للدارة، وفي الواقع يستخدم هذا الترانزستور لمنع الترانزستور الذي يُشبع عند فصل حمله من امتصاص تيار كبير من خط القواعد المشتركة فيؤدي بذلك إلى تخفيض تيارات الخرج.



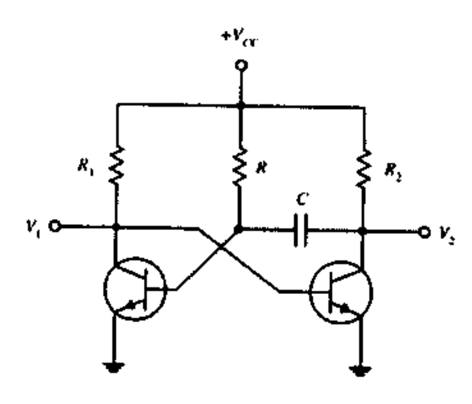
الشكل (43.4): مصادر تيار متعددة.

المهتزات (القلابات)



المهتز ثنائي الاستقرار: المهتز ثنائي الاستقرار هو دارة تصمم بحيث يبقى خرجها على إحدى حالتين لزمن غير محدَّد حتى تُطبق عليه إشارة تحكم تجبره على تغيير وضع خرجه، وبعد أن تغير الدارة وضع خرجها، فإنها تحتاج إلى إشارة تحكم أُخرى لتعود من وضع الخرج إلى حالة الخرج السابقة وفي الشكل (44.4) -الدارة الأولى تُعطي دارة ثنائي استقرار، ولفهم مبدأ عمل هذه الدارة افرض في البداية أن (V1 = 0V) وهذا يعني أن تيار قاعدة الترانزستور اليميني يساوي الصفر وبالتالي فتيار مجمعه يساوي الصفر، وكل التيار الذي يمر عبر المقاومة (R2) يمر عبر قاعدة الترانزستور اليساري فيقاد الترانزستور اليساري بسبب تيار القاعدة الكبير إلى الإشباع (saturation) وفي حالة الإشباع يكون جهد مجمع الترانزستور اليساري أي V1 مساوياً الصفر، كما فرضنا في البداية. الدارة متناظرة ولذلك يمكنك القول إن الدارة مستقرة و(V2 = 0) والترانزستور اليميني مشبع.

يمكن جعل المهتز ثنائي الاستقرار ينتقل من حالة إلى أخرى ببساطة بوصل (V1) أو (V2) إلى الأرض. يمكن استخدام المهتزات ثنائية الاستقرار كعناصر ذاكرية (memory devices) أو كمقسمات تردد وذلك لأن النبضات المتعاقبة تعيد الدارة إلى وضعها الابتدائي.

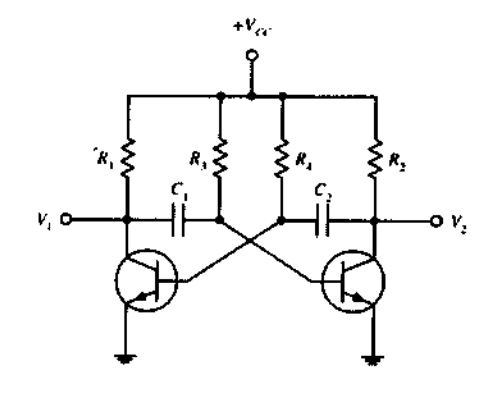


الشكل (44.4): دارات مهتزات ثنائي استقرار، وحيد استقرار وعديم استقرار.

المهتز أحادي الاستقرار: المهتز أحادي الاستقرار هو دارة ذات وضع استقرار وحيد، وتنتقل الدارة إلى حالة عدم استقرار بتطبيق نبضة خارجية عليها ولكنها تعود بعد فترة زمنية محددة ومن تلقاء نفسها إلى حالة الاستقرار. وفي الشكل (44.4) -الشكل الثاني تُعطي دارة وحيدة استقرار. عندما يكون (V1 = 0) تكون الدارة في وضعية استقرار، ولكن إذا قصرت (V2) لحظياً، أي لفترة قصيرة، فإن المكثف سيكون له سلوك يشبه دارة قصر (short circuit)، لأن المكثف يمرر التيار عندما يتغير الجهد عليه فجأة ولذلك عندما يمرر المكثف فإن كلاً من تيار قاعدة ومجمع الترانزستور اليساري يكون مساوياً للصفر، ويمر تيار المقاومة R1 إلى قاعدة الترانزستور اليميني ويبقى الترانزستور اليميني في حالة إشباع حتى يُعاد شحن المكثف (C) عبر المقاومة (R) وعندها تعود الدارة إلى حالة استقرارها السابقة. تعطي هذه الدارة نبضة مربعة في خرجها V1 ويتعلق زمن استمرارية النبضة بالثابت الزمني RC ولا يتعلق زمن استمرارية نبضة الخرج (V1) باستمرارية ومطال نبضة القدح التي تُطبق على V2.

المهتز عديم الاستقرار: هذه الدارة ليست مستقرة على أية حالة وتنتقل بشكل تلقائي من حالة إلى أخرى بمعدَّل محدّد، حتى بدون إشارات دخل. ولفهم مبدأ عمل هذه الدارة افرض أن الخرج V1 = 0، وهذا يعني أن قاعدة الترانزستور اليميني ستكون مؤرضة (على الأقل حتى ينشحن المكثف (C1) عبر المقاومة (R3) وعندما يشحن المكثف (C1) إلى قيمة محددة يُصبح جهد هذا المكثف مطبقاً على قاعدة الترانزستور اليميني فيشبع هذا الترانزستور وعندها يصبح الجهد V2 = 0 وبذلك يصبح جهد قاعدة الترانزستور اليساري صفراً (0V) فيقطع الترانزستور اليساري ويرتفع جهد خرجه أي (V1) إلى قيمة موجبة تساوي (Vcc) تقريباً ويبقى على هذه الحالة على الأقل حتى يُشحن (C2) عبر المقاومة (R4) وعندما يصبح جهد المكثف C2 كافياً لتشغيل الترانزستور اليساري يعمل هذا الترانزستور منتقلاً إلى الإشباع وتتكرر دورة العمل من جديد.

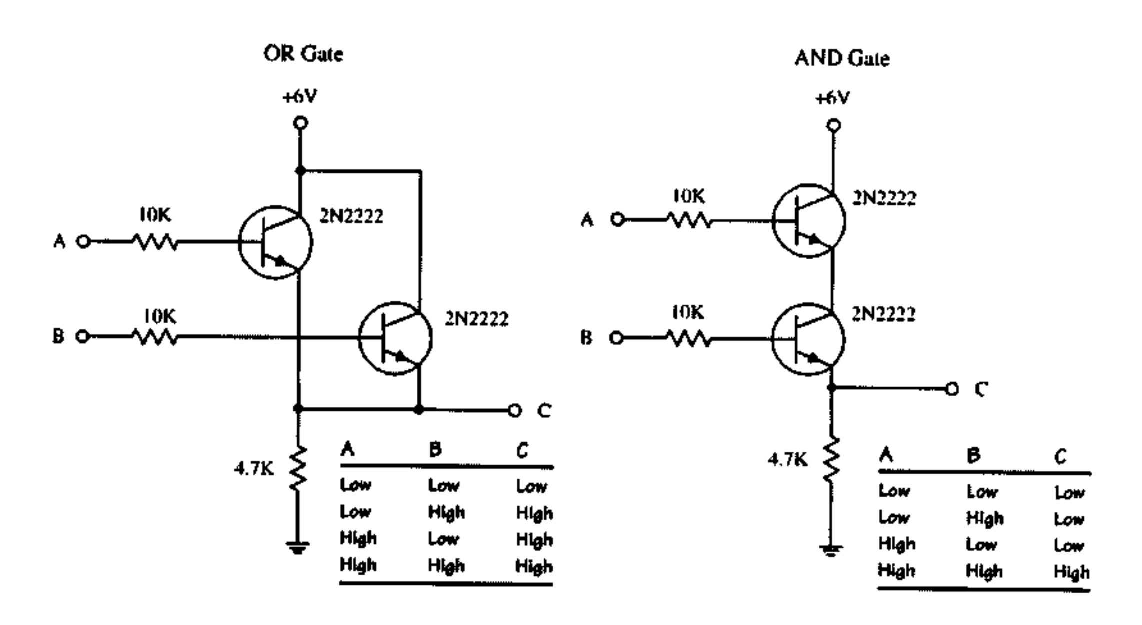
يتحدد الزمن الذي يبقى عليه الخرج في كل حالة بدارات (RC) الموجودة في المهتز ودارات RC التي تحدد دور الاهتزاز بالكامل هي R_3,C_1 وR_4,C_2، وكما تلاحظ فالمهتز عديم الاستقرار هو عبارة عن هزاز نبضي بسيط ويمكن ضبط فترة بقاء النبضة على حالة جهد موجب ودور النبضات بواسطة R_3,C_1 وR_4,C_2.



تابع الشكل (44.4): دارة مهتز عديم استقرار.

البوابات المنطقية الترانزستورية

تبيّن الدارات المعطاة في الشكل (45.4) بوابات منطقية ترانزستورية وفي بوابة (OR)، المبينة في الشكل اليساري ينتقل الخرج (C) إلى حالة high (جهد مرتفع) إذا كانت المداخل (A) أو (B) أو (A وB) في حالة (high)، وبكلام آخر إذا كان أحد المداخل على الأقل في حالة (high)، فإن الخرج سيكون في حالة (high)، لأن الترانزستور الذي يُطبق على قاعدته جهد عالٍ (high) ينتقل إلى حالة (on) وينقل الخرج إلى حالة (high). أما بوابة AND المبنية في الشكل (45.4) اليميني فإن خرجها لا يكون على حالة (high) إلا إذا كان (A) و(B) معاً على حالة (high)، أي أن كلا الترانزستورين يجب أن يكون في حالة (on) كي يكون الخرج (high). عندما نقول إن خرج الدارة على حالة (high) فهذا يعني أن جهد الخرج يساوي تقريباً جهد تغذية الدارة (6V تقريباً في الدارات المعطاة في الشكل).



OR Gate:

A	B	C
Low	Low	Low
Low	High	High
High	Low	High
High	High	High

AND Gate:

A	B	C
Low	Low	Low
Low	High	Low
High	Low	Low
High	High	High

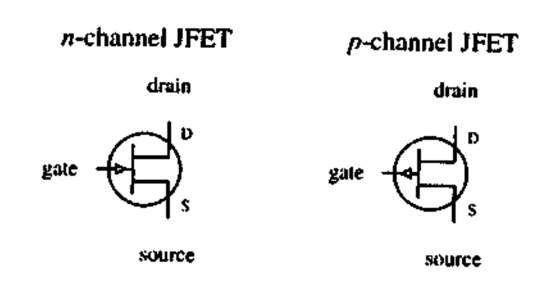
الشكل (45.4): بوابات (OR) و(AND) منطقية ترانزستورية.

3.3.4 الترانزستورات الحقلية ذات المتصل

الترانزستورات الحقلية ذات المتصل والتي تسمى اختصاراً باسم الترانزستورات الحقلية هي عناصر ذات ثلاثة أطراف (أرجل) مصنوعة من أنصاف النواقل وتستخدم كمفاتيح متحكم بها كهربائياً (electrically controlled switches)، أو كمضخمات (amplifiers) أو كمقاومات متحكم بها جهدياً VCR (Voltage Controlled Resistors)، والترانزستورات

الحقلية بعكس الترانزستورات ثنائية القطبية هي عناصر يتم التحكم بها جهدياً (يقتصر التحكم بها على الجهد) ولا تتطلب تيارات استقطاب في طرف الدخل. لترانزستورات JFET ميزة خاصة بها وهي أنها تكون في الحالة الطبيعية في وضع (on) عندما لا يكون هناك فرق جهد بين بوابتها ومنبعها (البوابة G والمنبع S والمصرف D هي أسماء أرجل الترانزستور الحقلي). أما إذا كان هناك فرق جهد بين (G) و(S) فإن الترانزستور الحقلي يصبح مقاوماً أكثر لمرور التيار عبر المصرف والمنبع، ولهذا السبب تسمى ترانزستورات (JFETs) بترانزستورات استنفاذ (أو نضوب depletion) بعكس الترانزستورات ثنائية القطبية التي هي في الواقع ترانزستورات تعزيز (يزداد التيار المار بين المجمع والباعث بزيادة جهد القاعدة وبالتالي بزيادة تيار القاعدة). تتوفر ترانزستورات JFETs بأنواع ذات قناة (n) (n-channel) وأخرى ذات قناة (p) p-channel. في ترانزستورات القناة (n) ينخفض التيار المار بين المصرف (D) والمنبع (S) بتطبيق جهد سالب على البوابة، لأن هذه الترانزستورات تعمل عندما يكون (VG < VS)، أما في الترانزستورات ذات القناة (P) فإن تطبيق جهد موجب على البوابة (G) يؤدي إلى تخفيض التيار المار بين المنبع (D) والمصرف (S) وتعمل هذه الترانزستورات عندما يكون (VS > VG). يبيّن الشكل (46.4) رموز وتسميات أرجل الترانزستورات الحقلية.

الميزة الهامة للترانزستورات الحقلية والمفيدة في التطبيقات هي مقاومة دخلها العالية جداً (والقيمة التقريبية لمقاومة الدخل حوالي $10^{10}\Omega$). ومقاومة الدخل العالية هذه تعني أن الترانزستورات الحقلية لا تستهلك تيارات من مصدر الإشارة المطبقة على الدخل (وفي الواقع تستهلك تيارات صغيرة جداً جداً ومن مرتبة الـ (pA)، وبالتالي ليس لهذه الترانزستورات أي تأثير على المصادر التي تُوصل مع دخلها. إن عدم استهلاك تيار من مصدر التحكم الموصول إلى دخل الترانزستور الحقلي وعدم مرور تيار غير مرغوب عبر بوابة الترانزستور الحقلي يعتبر أمراً هاماً جداً وله ايجابية كبيرة. إن إمكانيات الترانزستورات الحقلية على التحكم بمرور التيار مع المحافظة على ممانعة دخل عالية جداً يجعل من هذه الترانزستورات عناصر مفيدة لبناء مفاتيح تشابهية ثنائية الاتجاه، وكذلك في تصميم مضخمات بممانعات دخل عالية جداً أو في تشكيل منابع تيار أو دارات اهتزاز (oscillators)، ومفاتيح منطقية يتم التحكم بها عن طريق البوابة، هذا بالإضافة إلى إمكانية استخدامها في دارات المزج الصوتي (audio mixing circuits).

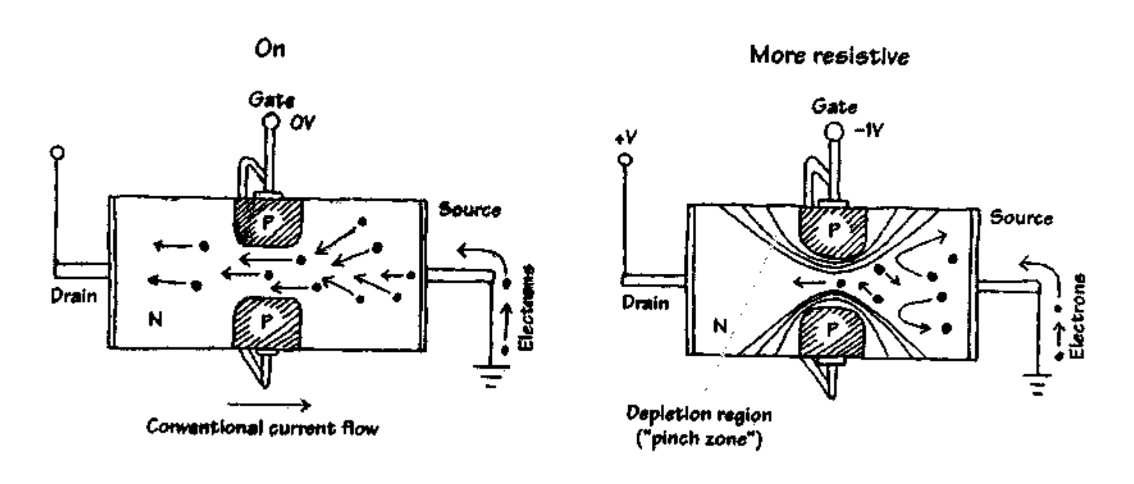


الشكل (46.4): رموز الترانزستورات الحقلية JFETs.

كيف يعمل الترانزستور الحقلي

يتكون الترانزستور الحقلي ذو القناة (n) من منطقة سيلكونية نوع (n) فيها منطقتان نوع (p) على شكل نتوءات كما في الشكل (47.4) على جانبي المنطقة (n). توصل رجل البوابة إلى المناطق (p) التي توصل مع بعضها، أما أرجل المصرف (D) drain والمنبع (S) source فتوصل إلى النهايات (الأطراف) المتقابلة للمادة (n). في حال عدم تطبيق جهد على طرف البوابة (G) في ترانزستور FET قناله (n)، فإن التيار يمر بحرية عبر القنال المركزية (n)، ولا توجد أية مشكلة بالنسبة للإلكترونات عندما تتحرك عبر القنال (n) وفي الأصل توجد إلكترونات حرة كثيرة في القنال نوع (n) وتساعد هذه الإلكترونات كثيراً في عملية نقل التيار. ولكن إذا طبق جهد سالب على البوابة (سالب بالنسبة للمنبع) فإن المنطقة المتوسطة من القنال والتي تقابل المناطق p سوف تضيق بسبب تشكل مناطق مجردة من الأعلى والأسفل (تتشكل منطقة مجردة على طرفي متصل pn

عند تطبيق جهد عكسي عليه) وتمتد هذه المناطق المجردة عبر القنال وتضيق القنال ويصبح مرور التيار أكثر صعوبة (يؤدي تشكل المناطق المجردة إلى تضيق القنال وبالتالي زيادة مقاومتها فينخفض التيار المار عبرها). في الترانزستور الحقلي ذي القنال (p) يُعكس كل شيء، أي يستبدل الجهد السالب بجهد موجب وتستبدل القنال (n) بقنال (p) والمناطق (p) بمناطق (n) وطبعاً تكون حوامل الشحنة في القنال هي الثقوب بدل الإلكترونات.



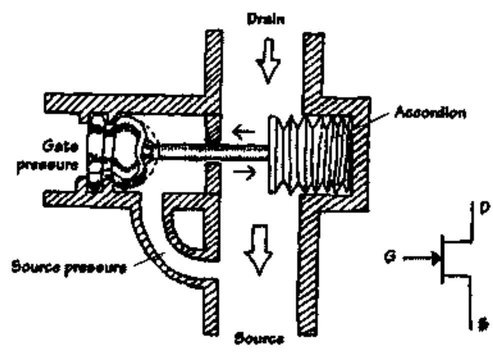
الشكل (47.4): بنية ترانزستور حقلي قنال (n) وجهود استقطابه.

التشابه بين ترانزستور حقلي ونموذج مائي

نبيِّن فيما يلي التشابهات بين الترانزستورات الحقلية قنال (n) وقنال (p) وبين نماذج مائية وفي هذه التشابهات نعتبر أن تدفق الماء في النموذج المائي يقابل التيار في الترانزستورات وأنّ ضغط الماء يقابل الجُهد الكهربائي.

التشابه بين ترانزستور FET بقنال n ونموذج مائي

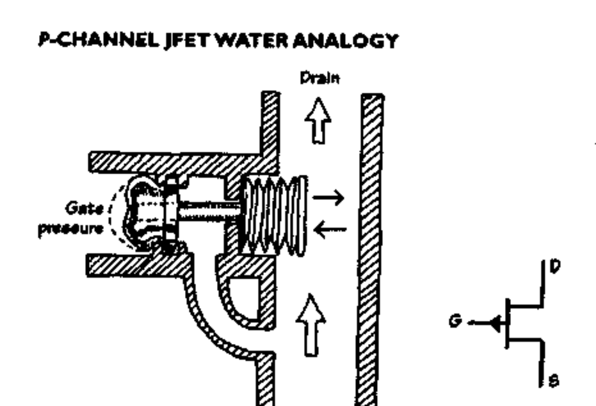
عندما لا يكون هناك أي ضغط بين البوابة والمنبع في النموذج المائي لترانزستور JFET قنال (n) يكون الترانزستور في حالة (on) بشكلٍ كامل ويمر الماء من أنبوب المصرف (D) إلى أنبوب المنبع (S). من أجل محاكاة ممانعة الدخل العالية في الترانزستور الحقلي زوِّد النموذج المائي بآلية دفع موصولة مع بوابة متحركة، وهذه البوابة تمنع التيار من الدخول إلى قنال المصرف-المنبع وتسمح بنفس الوقت للضغط بالتحكم بالبوابة التي يتدفق عبرها التيار. عندما تصبح بوابة الترانزستور الحقلي n-JFET أكثر سلبية فإن الضاغط (الدافع) يتحرك إلى اليسار في النموذج المائي وبذلك تُسْحب بوابة التدفق المشابهة للأوكورديون عبر قنال المنبع-المصرف وينخفض مرور التيار.



الشكل (48.4): نماذج مائية مشابهة بعملها لترانزستورات JFETs.

التشابه بين ترانزستور حقلي FET بقنال p ونموذج مائي

النموذج المائي لترانزستور حقلي FET بقنال (p) يشبه مثيله في الترانزستور السابق ما عدا أن كافة التيارات والضغوط بعكس الاتجاه. يكون الترانزستور الحقلي p-channel FET (ترانزستور بقنال p) في حالة (on) تمرير كلي حتى يُطبق جهد موجب على البوابة بالنسبة للمنبع وعندها وكما في الشكل المائي المكافئ تتحرك البوابة التي تتحكم بتدفق الماء عبر أنابيب المصرف والمنبع إلى اليمين وتضيق القنال وينخفض تدفق الماء. في الترانزستور ينخفض التيار بزيادة جهد البوابة إيجابية.



تابع الشكل (48.4): نماذج مائية مشابهة بعملها لترانزستورات JFETs.

مميزات الخواص

يبيِّن الشكل البياني التالي كيفية عمل ترانزستور حقلي JFET قنال (n). وفي الشكل يتم توضيح تأثير الجهد بين البوابة والمنبع (VGS) والجهد بين المصرف والمنبع (V_{DS}) على تيار المصرف (I_D). الشكل البياني الذي يبيِّن تأثير (V_{GS}) و(V_{DS}) على (I_D) في ترانزستور JFET قنال (p) يشبه الشكل المبيَّن هنا والفارق بينهما هو أن (I_D) في ترانزستور قنال (p) يتناقص بزيادة إيجابية الجهد (V_{GS}). وبكلامٍ آخر، V_{GS} يكون جهد موجب، وV_{DS} يكون جهد سالب.

عندما يكون جهد البوابة يساوي جهد المنبع فإنَّ:

$$V_{GS} = V_G - V_S = 0$$

يمر تيار أعظمي عبر الترانزستور الحقلي، ويسمى هذا التيار باسم تيار المصرف الموافق لاستقطاب صفري (drain-current for zero bias)، ويُرمز لهذا التيار بالرمز (I_{DSS}). I_{DSS} ثابت في الترانزستور ويختلف من ترانزستور لآخر.

لاحظ الآن كيف يتأثر التيار I_D بالجهد بين المصرف والمنبع (V_{DS}).

$$V_{DS} = V_D - V_S$$

عندما يكون V_{DS} صغيراً تكون تغيرات I_D تقريباً خطيّة بالنسبة لتغيرات V_{DS} (انظر إلى أحد المنحنيات الموافق لقيمة ثابتة للجهد V_{GS}). تسمى المنطقة من المميزات التي تتحقق فيها علاقة خطية بين (I_D) و(V_{DS}) باسم المنطقة الأومية (ohmic-region)، أو المنطقة الخطية (linear-region). في هذه المنطقة يكون سلوك الترانزستور الحقلي مثل سلوك مقاومة متحكم بها جهدياً (voltage-controlled resistor).

انظر إلى الشكل البياني وبالتحديد إلى المنطقة من الشكل التي تكون فيها منحنيات التيار مسطحة (موازية تقريباً للمحور V_{DS})، تسمى هذه المنطقة بالمنطقة الفعالة (active region)، وفي هذه المنطقة يتأثر التيار (I_D) كثيراً بالجهد (V_{GS}) ولا يتأثر بتغييرات V_{DS} (طبعاً عند قيمة محددة وثابتة لـ V_{GS})، وعليك الانتقال إلى الأعلى والأسفل بين المنحنيات كي تتأكد من ذلك. مثلاً من أجل (V_{GS} = -2V) لاحظ أن I_D يبقى ثابتاً تقريباً عند جهود V_{DS} تقع بين (7V) و(15V).

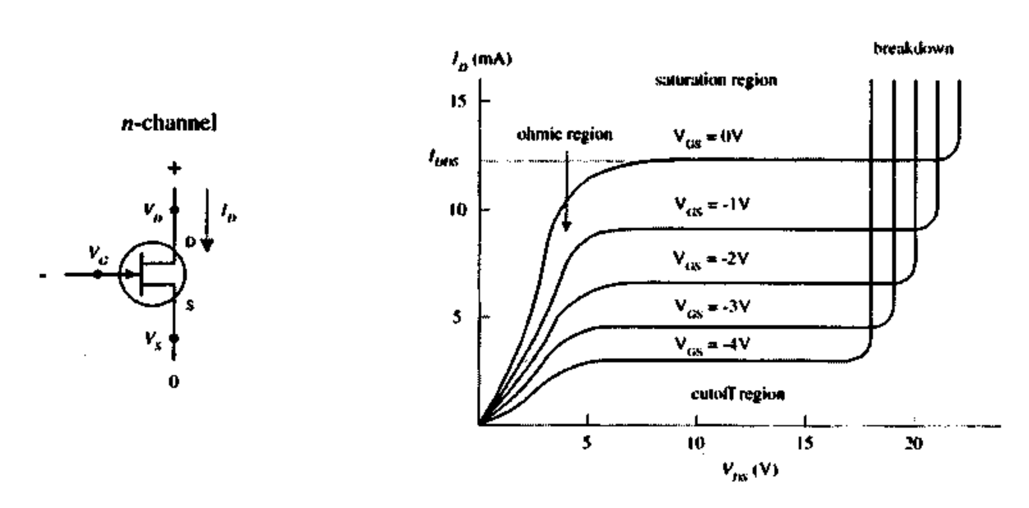
هناك قيمة لـ (V_{GS}) تنقل الترانزستور الحقلي إلى القطع وتسمى هذه القيمة جهد القطع (cutoff-voltage) وتسمى أحياناً باسم جهد الانقباض (pinch-off-voltage) ويرمز لها بالرمز (V_P) أو بالرمز ($V_{GS,off}$).

بمتابعة تحليل الشكل البياني تلاحظ أنه بزيادة V_{DS} تصل إلى نقطة يزداد عندها تيار المصرف (I_D) كثيراً جداً، وعند هذه النقطة لـ V_{DS} يفقد الترانزستور الحقلي القدرة على مقاومة مرور التيار وذلك لأن الجهد المطبق بين المصرف والمنبع يكون عالياً جداً، وفي لغة الترانزستورات الحقلية يسمى هذا الجهد باسم جهد الانهيار بين المنبع والمصرف (drain-source breakdown) ويعبر عن هذا الجهد بالرمز (BV_{DS}).

تتراوح قيم I_{DSS} في ترانزستور JFET نموذجي بين (1mA) و(1A). أما قيم $V_{GS,off}$ فتتراوح بين (-0.5V) و(-10V) في ترانزستور قناال (n) وبين (+0.5V) و(+10V) في ترانزستور قناال (p)، في حين تتراوح قيم BV_{DS} بين (6) و(50) فولت.

للترانزستورات الحقلية -كما هي الحال في الترانزستورات ثنائية القطبية- مقاومة داخلية (internal resistance) وهذه المقاومة هي في الواقع مقاومة القنال وتتغير هذه المقاومة بتغير التيار (I_D) وبتغير درجة الحرارة. يسمى مقلوب هذه المقاومة باسم الناقلية التبادلية (g_m) (trance conductance). تصل قيمة الناقلية التبادلية للترانزستورات الحقلية إلى بضعة آلاف الـ (Ω-1) والـ (Ω-1) هو ($1/\Omega$) أو مو أو سيمنز ℧.

هناك بارامتر آخر للترانزستور الحقلي وهو مقاومة الترانزستور عندما يكون في حالة عمل (on) ويُسمى هذا البارامتر (on-Resistance) ويرمز له بالرمز ($R_{DS,on}$) وتمثل ($R_{DS,on}$) المقاومة الداخلية للترانزستور عندما يكون في حالة تمرير كامل، أي عندما يكون ($V_{GS} = 0$). تتراوح قيم ($R_{DS,on}$) للترانزستورات الحقلية بين (10) و(1000Ω) وتعطى قيمة هذه المقاومة في جداول مواصفات العنصر.



الشكل (49.4): مميزات خرج ترانزستور FET قنال (n).

تعاريف وقوانين مفيدة

المنطقة الأومية: عندما يبدأ الترانزستور الحقلي بمقاومة مرور التيار، فإنه يعمل كمقاومة متغيرة.

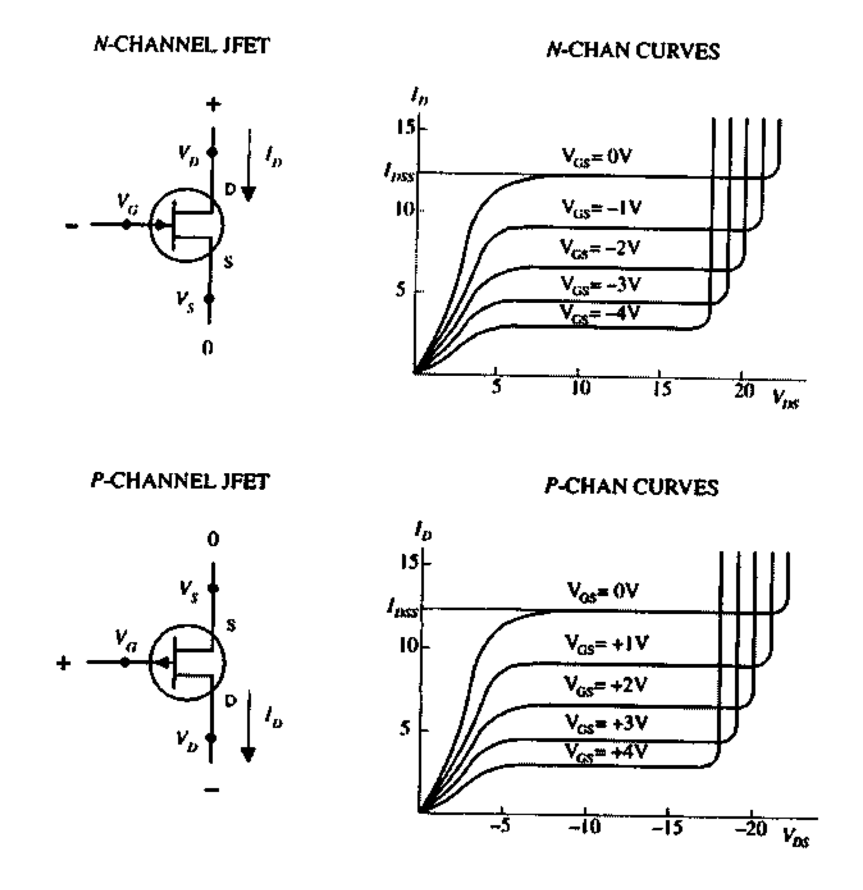
منطقة الإشباع: هي المنطقة التي يتعلق فيها تيار المصرف بالجهد (V_{GS}) ولا يتأثر تقريباً بتغيرات (V_{DS}).

جهد القطع: هو قيمة معينة لجهد البوابة يتوقف عندها تيار المصرف عن المرور ويصبح مساوياً للصفر ويكون الترانزستور كداره مفتوحة وعند هذه القيمة لجهد البوابة تكون مقاومة القنال أعظمية.

جهد الانهيار: هو الجهد الذي إذا طبق بين المنبع والمصرف في ترانزستور حقلي، فإن تيار المصرف يزداد كثيراً ويمكن أن يؤدي إلى تخريب الترانزستور.

تيار المصرف الموافق لاستقطاب صفري: يرمز لهذا التيار بالرمز (I_{DSS}) وهو التيار الذي يمر بين المنبع والمصرف عندما يكون فرق الجهد بين البوابة والمنبع يساوي الصفر أو عندما تكون البوابة موصولة مع المنبع $V_{GS} = 0$.

الناقلية التبادلية: تعبر الناقلية التبادلية عن معدَّل تغير تيار المصرف عند تغيير جهد البوابة-المنبع أو هو نسبة تغير تيار المصرف إلى تغير جهد البوابة-المنبع عند قيمة ثابتة لـــ V_{DS} وهو مماثل للناقلية التبادلية ($1/r_{tr}$) للترانزستور ثنائي القطبيّة.



الشكل (50.4): رموز ومميزات خرج الترانزستورات الحقلية.

وفيما يلي نلخص علاقات البارامترات الهامة للترانزستورات الحقلية:

علاقة تيار المصرف في المنطقة الأومية:

$$I_D = I_{DSS}[2(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,off}})\frac{V_{DS}}{-V_{GS,off}} - (\frac{V_{DS}}{V_{GS,off}})^2]$$

في ترانزستور JFET قنال (n) تكون $V_{GS,off}$ سالبة وفي ترانزستور قنال (p) تكون موجبة.

معادلة التيار I_D في المنطقة الفعالة:

$$I_D = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,off}})^2$$

$V_{GS,off}$ وI_{DSS} هي ثوابت للترانزستور ويمكن الحصول على قيمها من نشرات معطيات الترانزستور.

مقاومة المنبع–المصرف R_{DS}:

$$R_{DS} = \frac{V_{DS}}{i_D} = \frac{V_{GS,off}}{2I_{DSS}(V_{GS} - V_{GS,off})} = \frac{1}{g_m}$$

مقاومة المنبع–المصرف لترانزستور حقلي في حالة (on):

$R_{DS,on}$ = constant

الجهد بين المنبع والمصرف V_{DS}:

$$V_{DS} = V_D - V_S$$

الناقلية التبادلية للترانزستور الحقلي:

$$g_m = \left.\frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}\right|_{V_{DS}} = \frac{1}{R_{DS}}$$

$$= g_{m_0}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,off}}\right) = g_{m_0}\sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}$$

المقاومة التبادلية إذا كانت البوابة مقصورة:

$$g_{m_0} = \frac{2I_{DSS}}{V_{GS,off}}$$

بعض القيم النموذجية لبارامترات الترانزستورات الحقلية:

I_{DSS} : 1mA → 1A

$V_{GS,off}$: (-0.5V) → (-10V) ; (n) لترانزستور قنال

(+0.5V) → (+10V) ; (p) لترانزستور قنال

$R_{DS,on}$: 10Ω → 1000Ω

BV_{DS} : (6V) → 50V

gm at 1mA : 500 →3000 μmho

مسائل

المسألة (1):

إذا كان لديك ترانزستور JFET له البارامترات التالية:

I_{DSS} = 8mA; $V_{GS,off}$ = -4V

احسب تيار المصرف إذا كانت R = 1kΩ وV_{DD} = 18v بفرض أن الترانزستور يعمل في المنطقة الفعالة (انظر الشكل (51.4)).

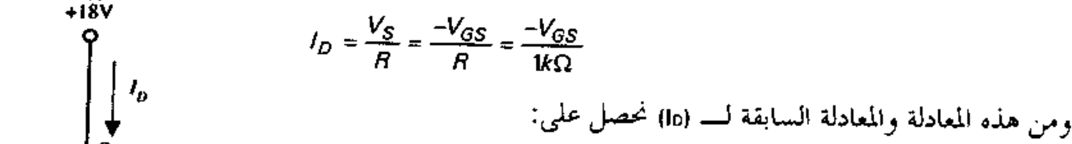
الحل: في المنطقة الفعالة تعطى معادلة تيار المصرف كما يلي:

$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,off}}\right)^2 \Rightarrow$$

$$I_D = 8mA\left(1 - \frac{V_G}{-4}\right)^2 = 8mA\left(1 + \frac{V_{GS}}{2} + \frac{V_{GS}^2}{16}\right)$$

وفي هذه المعادلة لدينا مجهولان هما I_D وV_{GS} ولذلك عليك حساب V_{GS} من الدارة:

$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - V_S = -V_S$$



وباعتبار $I_S = I_D$ وحسب قانون أوم نكتب العلاقة التالية:

$$I_D = \frac{V_S}{R} = \frac{-V_{GS}}{R} = \frac{-V_{GS}}{1k\Omega}$$

ومن هذه المعادلة والمعادلة السابقة لـــ (I_D) نحصل على:

$$\frac{-V_{GS}}{1k\Omega} = 8mA(1 + \frac{V_{GS}}{2} + \frac{V_{GS}^2}{16}) \Rightarrow$$

$$V_{GS}^2 + 10V_{GS} + 16 = 0$$

وبحل هذه المعادلة نحصل على قيمتين لـــ V_{GS} هما ($V_{GS} = -2V$) و($V_{GS} = -8V$) ولكن وبما أن العمل في المنطقة الخطية فإن (V_{GS}) يجب أن تكون واقعة بين (-4V) و(0V) لذلك نختار ($V_{GS} = -2V$) نعوّض هذه القيمة لـــ (V_{GS}) في معادلة التيار فنحصل على:

$$I_D = \frac{-V_{GS}}{R} = -\frac{(-2V)}{1k\Omega} = 2mA$$

الشكل (51.4): دارة المسألة الأولى.

مسألة (2):

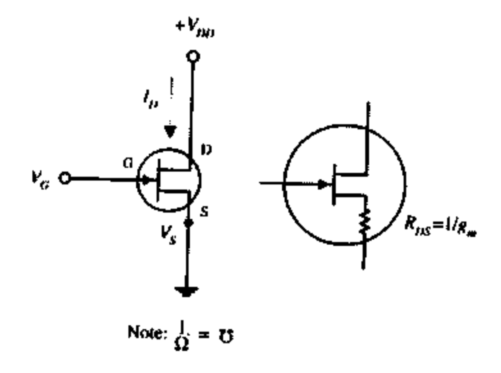
إذا كانت $V_{GS,off} = -4V$ و$I_{DSS} = 1mA$ أوجد قيم I_D، g_m، R_{DS} عندما تكون $V_{GS} = -2V$ و$V_{GS} = +1V$ وذلك بفرض أن الترانزستور يعمل في المنطقة الفعالة.

الحل:

عندما تكون $V_{GS} = -2V$

$$I_D = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,off}})^2$$

$$= 12mA(1 - \frac{-2}{-4}) = 3.0mA$$



الشكل (52.4): دارة المسألة الثانية.

ولإيجاد (g_m) عليك حساب g_{mo}:

$$g_{m_0} = -\frac{2I_{DSS}}{V_{GS,off}} = \frac{-2(12mA)}{-4V} = 0.006\mu hmos$$

$$g_m = g_{m_0}\sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} = (0.006mho)\sqrt{\frac{3mA}{12mA}} = 0.003mho$$

ولإيجاد R_{DS} نستخدم العلاقة:

$$R_{DS} = \frac{1}{g_m} = \frac{1}{0.003mho} = 333\Omega$$

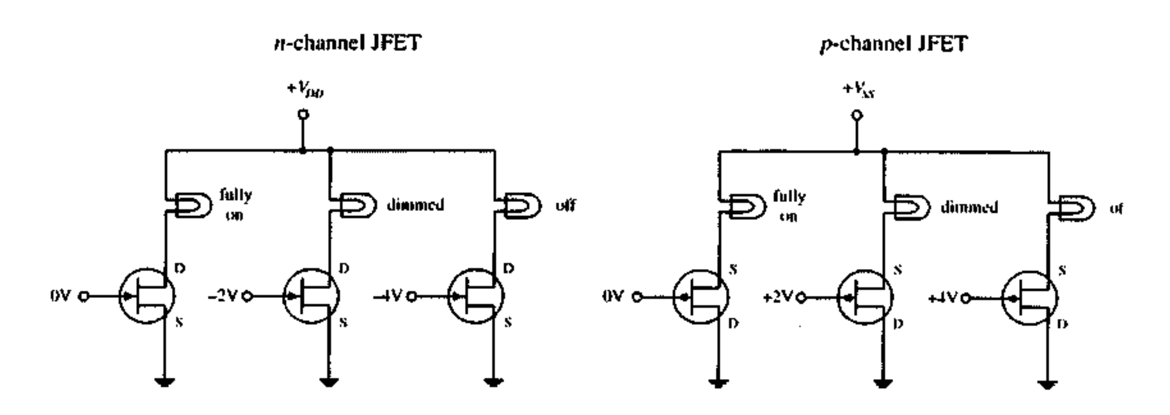
وباستخدام نفس المعادلات نحصل على القيم التالية عندما يكون $V_{GS} = +1V$.

$I_D = 15.6mA;\ g_m = 0.0075mho = 7500\mu mho,\ R_{DS} = 133\Omega$

تطبيقات أساسية

متحكم بالإضاءة

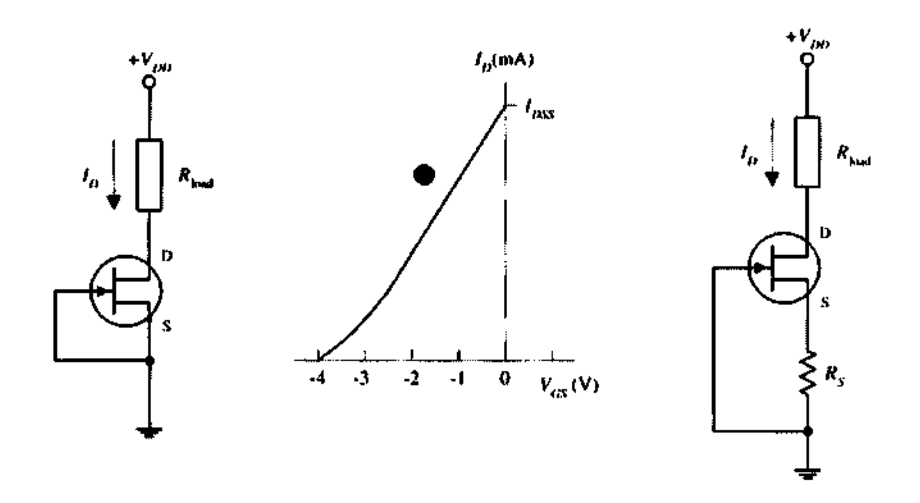
يبيِّن الشكل (53.4) دارتين توضحان كيفية عمل الترانزستور الحقلي كمتحكم بالإضاءة عن طريق الجهد. في ترانزستورات القنال (n) تنخفض الإضاءة بزيادة سلبية جهد البوابة، وذلك بسبب زيادة المقاومة بين المصرف والمنبع، أما في ترانزستورات القنال (p) فإن زيادة جهد البوابة إيجابية تؤدي إلى انخفاض الإضاءة بسبب زيادة المقاومة R_{DS}.



الشكل (53.4): دارات تحكم بالإضاءة باستخدام ترانزستورات FET.

دارة منبع تيار أساسية ودارة مضخم أساسي

يمكن بناء دارة منبع تيار بوصل البوابة مع المنبع، كما في الدارة اليسارية من الشكل (54.4)، وتسمى هذه الدارة باسم دارة استقطاب ذاتي (self-biasing) وفيها نلاحظ أن $V_G = V_S$ وبالتالي ($V_{GS} = V_G - V_S = 0$) والتيار (I_D) يساوي (I_{DSS}) وسلبية هذه الدارة هي أن قيمة (I_{DSS}) لترانزستور ما لا يمكن تحديدها بالضبط، لأن كل ترانزستور له (I_{DSS}) الخاص به وتختلف قيم (I_{DSS}) حتى للترانزستورات التي لها نفس النوع، ولذلك فإن التيار في منبع التيار هذا غير قابل للضبط. يمكن ضبط التيار بوصل مقاومة بين المنبع والأرض كما في الدارة اليمينية. يمكن تخفيض (I_D) بزيادة (R_S) وبالعكس (راجع المسألة 2) -تيار الدارة اليمينية قابلة للضبط بواسطة (R_S) ولا يتغيّر كثيراً بتغير V_{DS}. لاحظ بساطة دارات منابع التيار هذه، ولكن استقرارها أقل من استقرار دارات منابع التيار التي تعمل على ترانزستورات ثنائية القطبيّة.



الشكل (54.4): دارات منبع تيار.

دارة تابع منبعي

تسمى الدارات المبنية في الشكل (55.4) باسم تابع منبعي، وهي مشابهة لدارات تابع الباعث، وهي تعطي ربح تيار ولا تعطي ربح جهد. يمكن حساب مطال إشارة الخرج بتطبيق قانون أوم.

$V_S = R_S \cdot I_D$

والقانون:

$$I_D = g_m . V_{GS} = gm(V_G - V_S)$$

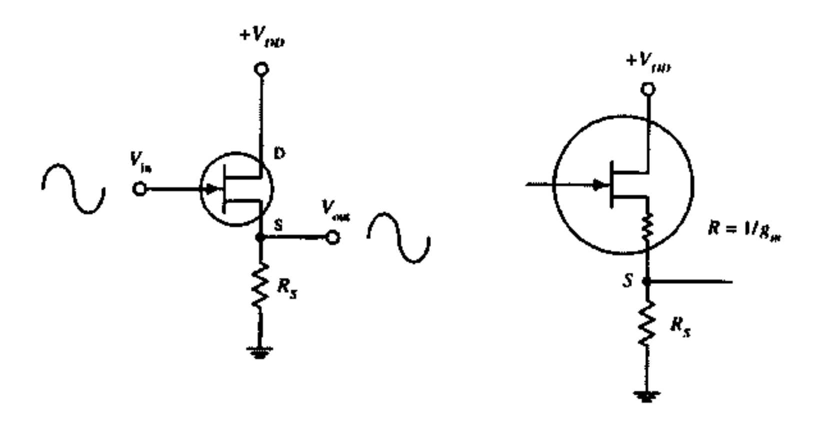
ومن هاتين العلاقتين نحصل على:

$$V_S = \frac{R_S . g_m}{1 + R_S . g_m} V_G$$

وبما أن $V_G = V_{in}$ و $V_S = V_{out}$ فإن ربح الجهد هو:

$$\frac{V_S}{V_G} = Gain = \frac{R_S g_m}{1 + R_S g_m}$$

مقاومة الخرج، وكما رأيت في المسألة الثانية هي $(1/g_m)$. مقاومة دخل دارة التابع المنبعي عالية جداً، ولذلك فهي لا تستهلك عملياً أي تيار من منبع الإشارة (أي تيار دخلها يساوي الصفر). ولكن الناقلية التبادلية للترانزستور الحقلي أصغر من مثيلتها في الترانزستور ثنائي القطبية ولذلك فإن جهد خرج التابع المنبعي يكون أخفض من جهد خرج تابع الباعث إذا كان جهد الدخل متساوياً في الدارتين. إذا اعتبرت أن $(1/g_m)$ هي المقاومة الداخلية للقنال بين المنبع والمصرف (انظر الدارة اليمينية في الشكل (55.4))، فإن تغيرات إشارة الدخل تؤدي إلى تغيرات في تيار المصرف ولذلك تتغيّر g_m مع تغيرات إشارة الدخل وبالتالي تتغير مقاومة الخرج، مما يؤدي إلى تشوهات في جهد الخرج. هناك مشكلة أخرى في هذه الدارة وهي أن (V_{GS}) هي بارامتر يصعب التحكم به (نتيجة للتصنيع (result of manufacturing))، ولذلك سيكون هناك انزياح غير معروف بالجهد المستمر (dc offset).



الشكل (55.4): دارة تابع منبعي.

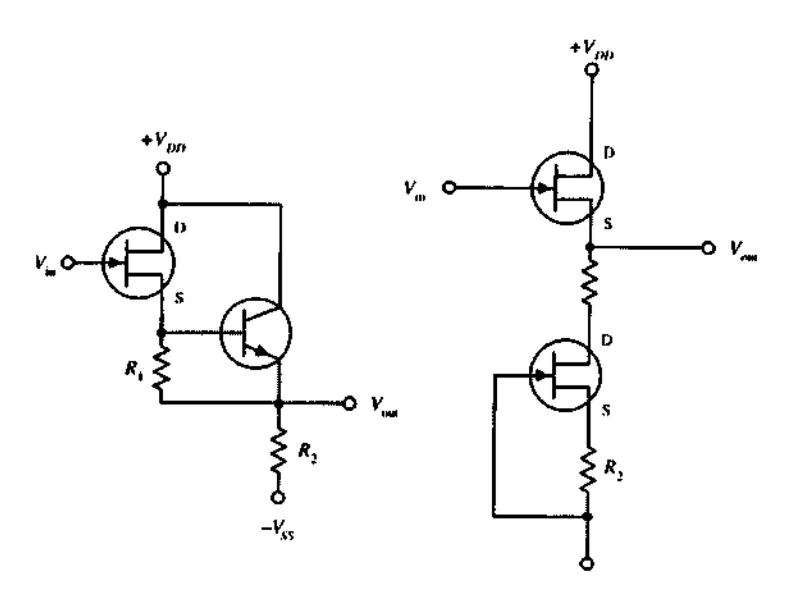
تابع منبعي محسن

إن دارة التابع المنبعي السابقة ضعيفة الخطية، كما أن انزياح الجهد المستمر فيها غير معروف، ويمكن التخلص من هذه السلبيات باستخدام إحدى الدارات المبينة في الشكل (56.4). في الدارة اليسارية تم استبدال مقاومة المنبع بدارة منبع تيار يعمل على ترانزستور ثنائي القطبيّة. يعمل منبع التيار على تثبيت الجهد V_{GS} على قيمة ثابتة وبذلك يتم إلغاء عدم الخطية، ومن أجل تحديد الإزاحة (dc offset) يتم ضبط المقاومة (R1)، R2 تقوم بنفس وظيفة (R_S) في دارة الشكل (54.4)، أي أنها تحدِّد الربح. في الدارة اليمينية من الشكل (56.4) يستخدم منبع تيار يعمل على ترانزستور حقلي، وهذه الدارة، وبعكس دارة الترانزستور ثنائي القطبية لا تحتاج إلى ضبط، كما أنها ذات استقرار حراري أفضل. ترانزستورا الـــ FET الموجودان في الشكل (56.4) اليميني يجب أن يكونا متوافقين بالبارامترات ويمكن أن يتوفرا كزوج في غلاف مشترك ويستهلك الترانزستور السفلي مقداراً مناسباً من التيار لجعل $(V_{GS} = 0)$، وهذا يعني أن $(V_{GS} = 0)$ لكلا الترانزستورين.

وهذا يجعل الترانزستور العلوي تابعاً منبعياً بإزاحة صفرية، وبما أن الترانزستور السفلي يتجاوب مباشرة مع الترانزستور العلوي، فإن أية تغيرات حرارية يتم تعويضها. عند اختيار R2 = R1، فإن ($V_{out} = V_{in}$).

تؤدي المقاومات إلى تحقيق خطية أفضل في الدارة، وتسمح لك بضبط تيار المصرف على قيمة لا تساوي (I_{DSS})، وبذلك تساعد على تحسين الخطية.

تستخدم التوابع المنبعية عادة كمراحل دخل للمضخمات، وكذلك في أجهزة الاختبار (test instruments) ومع غيرها من التجهيزات التي توصل مع مصادر الإشارة (sources) ذات ممانعات الخرج المرتفعة.

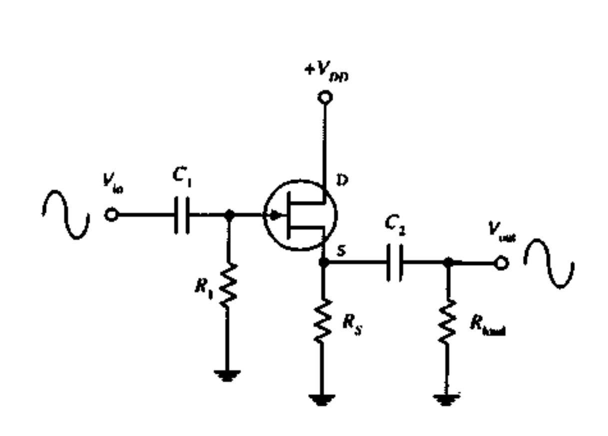


الشكل (56.4): دارات توابع منبعية محسنة.

مضخمات الترانزستورات الحقلية

مضخم التابع المنبعي: تذكر دارة التابع الباعثي ومضخم التابع الباعثي في الترانزستورات ثنائية القطبية في الفقرة السابقة.

توجد دارات تناظر التابع الباعثي ومضخم التابع الباعثي في عالم الترانزستورات الحقلية، وهذه الدارات هي التابع المنبعي ومضخم المنبع المشترك (common source amplifier). تبيّن الدارة في الشكل (57.4) مضخماً بتوصيلة تابع منبعي، وتؤمن هذه الدارة ربح جهد بعكس دارة المضخم بوصلة تابع الباعث التي كانت تؤمن ربح تيار، ويُعطى ربح الجهد لدارات تابع منبعي ومضخم منبع مشترك بالعلاقات:



الشكل (57.4): مضخم بوصلة تابع منبعي.

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_S}{R_S + (1/g_m)} \; ; \text{(دارة تابع منبعي)}$$

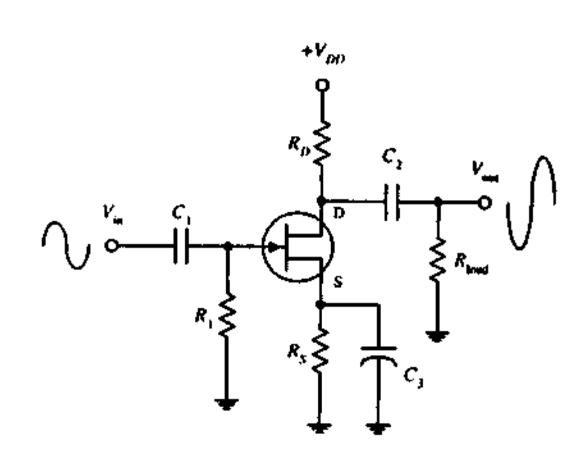
$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} = g_m \cdot \frac{R_D R_1}{R_D + R_1} \; ; \text{(دارة مضخم تابع منبعي)}$$

وتعطى الناقلية التبادلية بالعلاقة:

$$g_m = g_{m_0}\sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}; g_{m_0} = \frac{2I_{DSS}}{V_{GS,off}}$$

تستخدم المقاومات (RS) و(R1) لتأمين استقطاب البوابة ولضبط تيار نقطة العمل. أما المكثفات فتستخدم كمكثفات ربط وتشكل مع المقاومات مرشحات تمرير عالٍ. لاحظ أن المضخم الحقلي يحتاج إلى مقاومة استقطاب ذاتي واحدة، (R1) في الشكل (57.4).

مضخم بوصلة منبع مشترك: قبل أن نبدأ بالتعرف على هذه الدارة نجيب على سؤال قد يطرح نفسه كثيراً، وهو لماذا نستخدم مضخماً حقلياً (يعمل على ترانزستور حقلي) بدلاً من مضخم يعمل على ترانزستور ثنائي القطبيّة؟ والجواب على ذلك هو لأن المضخم الحقلي يمتاز بممانعة دخل عالية وبالتالي بتيار دخل منخفضٍ جداً، ولكن إذا لم تكن هناك ضرورة لمقاومة الدخل العالية، فمن الممكن استخدام دارة مضخم عادي (غير حقلي) أو مضخم عملياتي (op amp). في الواقع هناك مشكلة في خطية المضخمات العادية بالمقارنة مع المضخمات الحقلية، فالمضخمات الحقلية أكثر خطية من العادية، أما المضخمات العادية فتعطي ربحاً أكبر من ربح المضخمات الحقلية، وذلك لأن الناقلية التبادلية للترانزستورات الحقلية أقل من مثيلتها في الترانزستورات العادية عند نفس مستويات التيار، ويمكن أن يكون الفرق بين (g_m) لترانزستور عادي و(g_m) لترانزستور حقلي أكبر من (100)، ولذلك فالربح في المضخمات الحقلية أقل من ربح الترانزستورات ثنائية القطبية.



تابع الشكل (57.4): مضخم بوصلة تابع منبعي.

في دارة مضخم بوصلة منبع مشترك يُطبق الدخل على طرف البوابة ويؤخذ الخرج من المصرف. (C1) و(C2) هي مكثفات ربط متناوب و(C1) تشكل مع (R1) مرشح تمرير عالٍ وكذلك تشكل C2 مع R_{load} مرشح تمرير عالٍ.

يُسمى المكثف (C3) مكثف تمرير جانبي (bypass capacitor) وهو يقصر المقاومة (R_S) بالنسبة للإشارات المتناوبة. دارة المضخم بوصلة المنبع المشترك مبينة في الشكل (57.4).

مقاومة متحكم بها جهدياً

رأيت في مميزات خرج الترانزستور الحقلي أن الترانزستور يعمل في المنطقة الأومية إذا كان V_{DS} منخفضاً بقدرٍ كاف، وفي هذه المنطقة تكون علاقة I_D بالجهد V_{DS} تقريباً بشكلٍ خط مستقيم. ويعتبر V_{DS} منخفضاً وتتحقق العلاقة الخطية بين I_{DS} وV_{DS} إذا كان V_{DS} أصغر من ($V_{GS} - V_{GS,off}$). إذن في هذه المنطقة يعمل الترانزستور الحقلي كمقاومة متحكم بها جهدياً بالنسبة للإشارات الصغيرة بنوعي قطبيتها. إذا أخذت مقسم جهد مثلاً واستبدلت إحدى المقاومات بترانزستور JFET، فإنك تحصل على مقسم جهد متحكم به جهدياً، انظر الجزء العلوي من الشكل (58.4). يتعلق المجال الذي يعمل فيه ترانزستور JFET كمقاومة متغيرة بالترانزستور نفسه ويتناسب إلى حدٍ ما مع مقدار زيادة جهد البوابة عن ($V_{GS,off}$)، وكي يعمل الترانزستور في منطقة المقاومة الأومية من الضروري إبقاء ($V_{DS} < V_{GS,off}$) ويجب أيضاً أن يكون $|V_{GS}| < |V_{GS,off}|$.

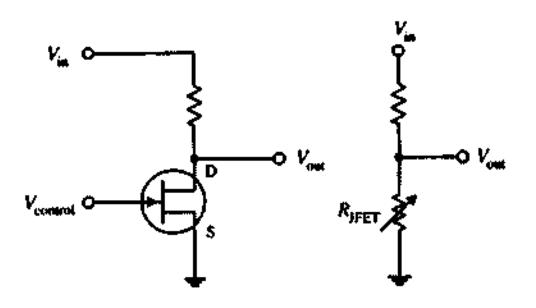
تستخدم الترانزستورات الحقلية JFET كمقاومة متحكم بها جهدياً في وحدات التحكم الإلكتروني بالربح، وفي دارات المخمدات (attenuators) وفي المرشحات ذات تردد القطع أو التردد المركزي المتحكم به إلكترونياً وفي المزاز بالإضافة إلى

استخدامها أيضاً في دارات التحكم بالمطال (amplitude control circuits). يبيّن الشكل (58.4) دارة تحكم إلكتروني بالمطال، ويُعطى ربح الجهد لهذه الدارة بالعلاقة:

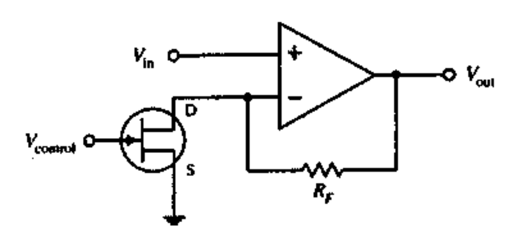
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_F}{R_{DS(on)}}$$

$R_{DS(on)}$: هي مقاومة القنال للترانزستور بين المصرف (D) والمنبع (S).

إذا كانت $RDS(on) = 1k\Omega$ و $RF = 29k\Omega$ فإن الربح سيكون (30) وعندما تقترب (V_{GS}) من ($V_{GS,off}$) تزداد $R_{DS(on)}$ وتصبح كبيرة، $R_{DS(on)} << R_F$، وينخفض الربح إلى قيمته الدنيا القريبة من الواحد وبذلك تلاحظ أن ربح هذه الدارة يمكن تغييره بهامش يزيد على نسبة (30:1).



Electronic gain control

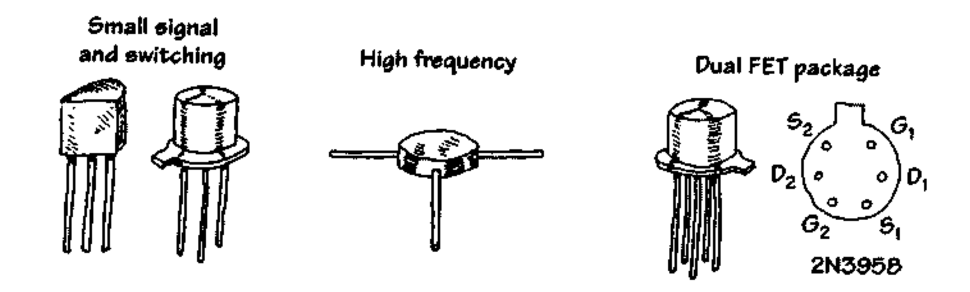


الشكل (58.4): استخدامات الترانزستور الحقلي كمقاومة خطيّة.

اعتبارات عملية

تُصنف الترانزستورات الحقلية عملياً إلى المجموعات التالية:

- ترانزستورات تستخدم عادة لتوصل المنابع ذوات ممانعات الخرج العالية مع مضخمٍ أو مع جهاز كراسم إشارة مثلاً (oscilloscope). كما تستخدم هذه الترانزستورات أيضاً كمفاتيح متحكم بها جهدياً.
- ترانزستورات حقلية للترددات العالية (High frequency JFETs) وتستخدم بشكلٍ أساسي لتضخيم الإشارات عالية التردد (مجال الترددات RF)، أو تستخدم كمفاتيح تعمل بترددات فتح وإغلاق عاليّة.
- ترانزستور JFET المضاعفة (Dual JFETs) ويحوي الغلاف الواحد من هذه الترانزستورات على ترانزستورين متوافقين (two matched JFETs). وكما ذكرنا سابقاً يمكن أن تستخدم أزواج ترانزستورات JFET المتوافقة لتحسين خطية تابع المنبع. يبيّن الشكل (59.4) أشكال نماذج الترانزستورات الحقلية المذكورة هنا.



الشكل (59.4): أشكال الترانزستورات الحقلية.

الترانزستور الحقلي، وكما هي الحال في الترانزستورات ثنائية القطبية، يمكن أن يتخرب إذا تم تجاوز التيارات والجهود وعند استخدام الترانزستور الحقلي يجب عليك أن تتأكد من عدم تجاوز جهود الانهيار وتياراته. يبيّن الجدول (2.4) نموذجاً لقيم جهود وتيارات حدية لبعض أنواع الترانزستورات الحقلية، ويعطيك هذا الجدول بعض القيم لبارامترات ترانزستور حقلي من طراز معين.

الجدول (2.4): جزء من جدول مواصفات ترانزستورات حقلية.

TYPE	POLARITY	BV_{GS}(V)	I_{DSS} (mA)		$V_{GS,OFF}$ (V)		G_M TYPICAL	C_{ISS}	C_{RSS}
			MIN (mA)	MAX (mA)	MIN (V)	MAX (V)	(umho)	(pF)	(pF)
2N5457	n-ch	25	1	5	-0.5	-6	3000	7	3
2N5460	p-ch	40	1	5	1	6	3000	7	2
2N5045	Matched-pair n-ch	50	0.5	8	-0.5	-4.5	3500	6	2

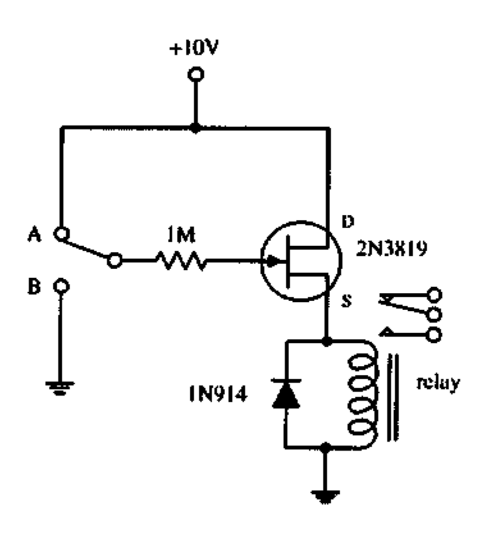
تطبيقات

دارة قيادة حاكمة

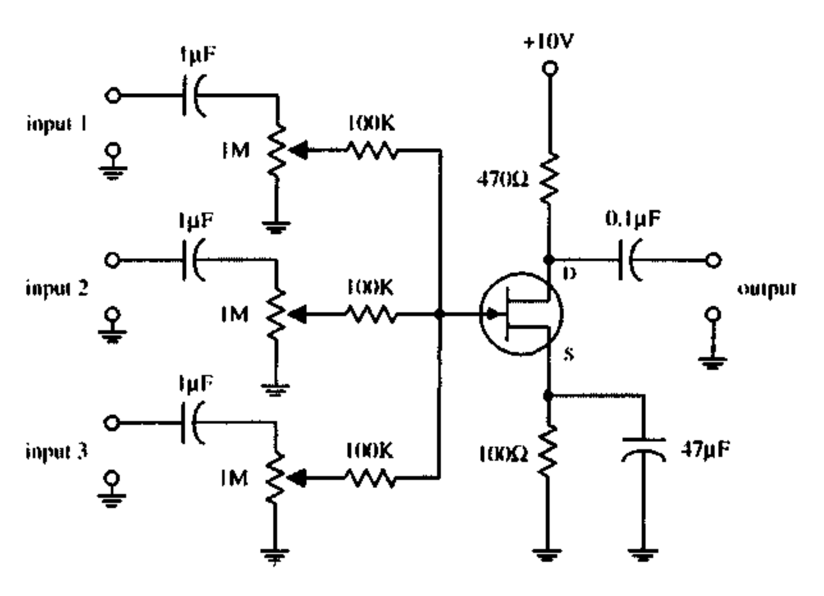
يبيّن الشكل (60.4) دارة قيادة حاكمة، وفي هذه الدارة يُستخدم ترانزستور JFET قنال (n). عندما يوضع المفتاح على الوضع (A) يكون الترانزستور في حالة (on)، لأن البوابة غير مستقطبة بحيث يعمل الترانزستور في نمط النضوب (depletion)، ويمر تيار عبر الترانزستور الحقلي وبالتالي عبر ملف الحاكمة ويؤدي ذلك إلى تغيُّر وضعيات تماسات الحاكمة. عندما يوضع المفتاح على الوضع (B) يُصبح جهد البوابة سالباً بالنسبة للمنبع ويؤدي ذلك إلى وضع الترانزستور في حالة قطع فيتوقف التيار عن المرور عبر الترانزستور وعبر الحاكمة وتعود تماسات الحاكمة إلى حالة الراحة.

مضخم/مازج صوتي

تستخدم هذه الدارة لمزج إشارات صوتية من مصادر مختلفة باستخدام دارة ترانزستور JFET بتوصيلة منبع مشترك. وهذه الإشارات يمكن أن تكون من ميكروفونات (microphones) أو من مضخمات أولية (preamplifiers). تطبق كافة الإشارات إلى دخل المازج/المضخم عبر مكثفات ربط متناوب. يتم اختيار مقاومات المصرف والمنبع بحيث يتم الحصول على الربح المطلوب، أما المقاومات المتغيرة (1MΩ) فهي مقاومات متغيرة مستخدمة هنا للتحكم بمقدار الربح لإشارة كل مدخل.



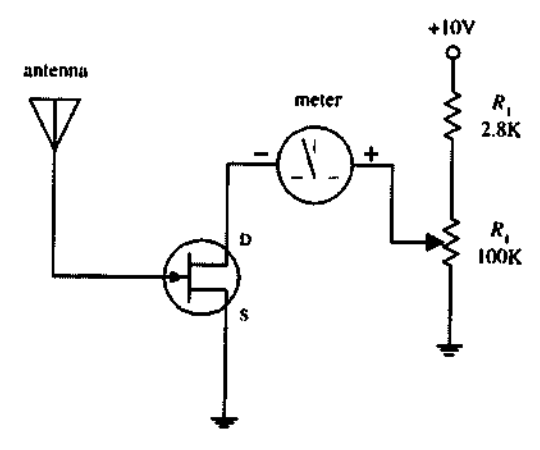
الشكل (60.4): دارة قيادة حاكمة.



الشكل (61.4): مازج/مضخم صوتي.

مقياس حقل كهربائي

في دارة الشكل (62.4) يستخدم ترانزستور حقلي JFET لتكوين كاشف كهرباء ساكنة (static electricity detector). عندما يوضع الهوائي، الذي هو عبارة عن سلك بسيط بجوار جسم مشحون فإن الالكترونات في الهوائي سوف تجذب إلى قاعدة الترانزستور الحقلي أو تُدفع مبتعدة عنها، وذلك حسب كون شحنة الجسم موجبة أو سالبة، وتؤدي إعادة توزع الإلكترونات إلى خلق جهد على البوابة يتناسب مع الشحنة المتوضعة على الجسم، وبنفس الوقت يبدأ الترانزستور الحقلي إما بمقاومة مرور التيار أو بالسماح للتيار بالمرور عبره مما يؤدي إلى انحراف إبرة المقياس. تستخدم المقاومة (R1) لحماية مقياس الأمبير. أما المقاومة R2 فتستخدم لضبط ومعايرة المقياس.



الشكل (62.4): مقياس حقل كهربائي.

4.3.4 ترانزستورات MOSFET

إن ترانزستورات MOSFET واسعة الانتشار جداً وكثيرة الاستخدام وهي نوعاً ما تشبه ترانزستورات JFETs، فعندما يُطبق جهد صغير على بوابة هذه الترانزستورات يتغير التيار الذي يمر فيها، ولكن ترانزستورات MOSFET لها ممانعة دخل عالية جداً جداً في طرف البوابة، إذ تزيد هذه الممانعة عن ($10^{14}\Omega$)، أما في ترانزستورات JFET فتبلغ مقاومة طرف البوابة تقريباً ($10^{9}\Omega$)، وهذا يعني أن ترانزستورات MOSFET لا تستهلك تيارات في طرف البوابة. ويعود سبب ارتفاع ممانعة (مقاومة) دخل طرف البوابة لترانزستورات MOSFET إلى هذه القيم إلى استخدام عازل مكوَّنٍ من أوكسيد معدن(Metal Oxide) فوق منطقة البوابة، وهناك ثمن لمقاومة الدخل العالية هذه وهو سعة صغيرة جداً بين البوابة والقنال (very small gate to channel capacitance) بضعة pF، فإذا تكونت شحنات ساكنة كثيرة على بوابة بعض أنواع ترانزستورات MOSFET بسبب لمسها أو التعامل معها فإن الشحنة المتراكمة يمكن أن تعبر البوابة وتؤدي إلى تخريب الترانزستور الحقلي (بعض الترانزستورات الحقلية من نوع MOSFET مصممة لتكون محميّة من هذا التأثير، ولكن ليس كل الأنواع).

النوعان الأساسيان لترانزستورات MOSFET هما:

- ترانزستورات MOSFET من النوع المعزِّز (enhancement type).
- ترانزستورات MOSFET من النوع المقلل (depletion-type MOSFETs).

انظر الشكل (63.4). تكون ترانزستورات MOSFET من النمط المقلل أو نمط النضوب عادة في الوضع الطبيعي في حالة (on)، أي يمر تيار أعظمي من المصرف إلى المنبع وذلك عندما لا يكون هناك فرق في جهد البوابة والمنبع، أي عندما يكون ($V_{GS} = V_G - V_S = 0$)، أما عند تطبيق جهد معيَّن على طرف البوابة، فإن الترانزستور يصبح أكثر مقاومة للتيار، وهذا السلوك يشبه سلوك ترانزستورات JFET. أما ترانزستورات MOSFET من النمط المعزِّز فتكون في الوضع الطبيعي في حالة (off) ويمر تيار أصغري من المصرف إلى المنبع عندما يكون ($V_{GS} = 0$)، أما عندما يُطبق جهد على البوابة فإن الترانزستور يصبح أقل مقاومة للتيار. يتوفر نوعا الترانزستور MOSFET المعزز والمقلل بقنال (n) وقنال (p).

في ترانزستور MOSFET قنال (n) من النوع المقلل يؤدي تطبيق جهد سالب على البوابة ($V_G < V_S$) إلى زيادة مقاومة القنال، أما في ترانزستور قنال p من نفس النوع فإن مقاومة القنال تزداد إذا كان ($V_G < V_S$) أي إذا كان جهد البوابة موجباً بالنسبة للمنبع.

إذا كان جهد البوابة موجباً بالنسبة لجهد المنبع $V_G > V_S$ في ترانزستور قنال (n) من النوع المعزِّز، فإن مقاومة قنال المصرف–منبع تنخفض.

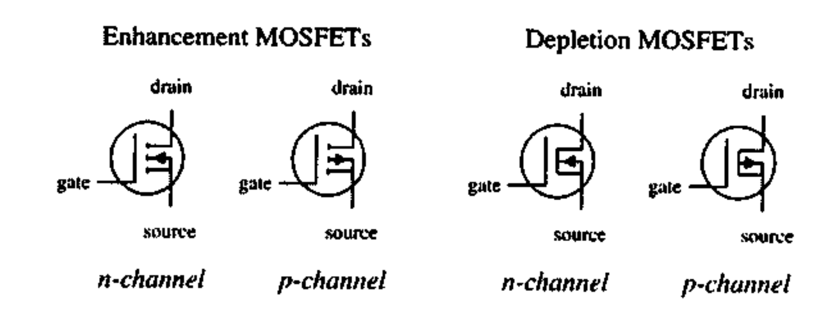
في ترانزستور قنال (p) من النوع المعزز، إذا كان جهد البوابة سالباً بالنسبة للمنبع ($V_G < V_S$)، فإن مقاومة قنال المصرف–منبع تنخفض.

إن ترانزستورات MOSFET هي أكثر أنواع الترانزستورات استخداماً هذه الأيام وذلك للأسباب التالية:

- استهلاكها المنخفض جداً للتيار في طرف الدخل.
- سهولة تصنيعها.
- صغر حجمها.
- استهلاكها المنخفض للطاقة.

وتستخدم ترانزستورات MOSFET كمضخمات ذات مقاومات دخل فوق العالية (ultra high)، وكمقاومات متحكم بها جهدياً، وفي دارات المفاتيح، كما توجد في الدارات المتكاملة ذات درجة التكامل العالية (large-scale integrated ICs).

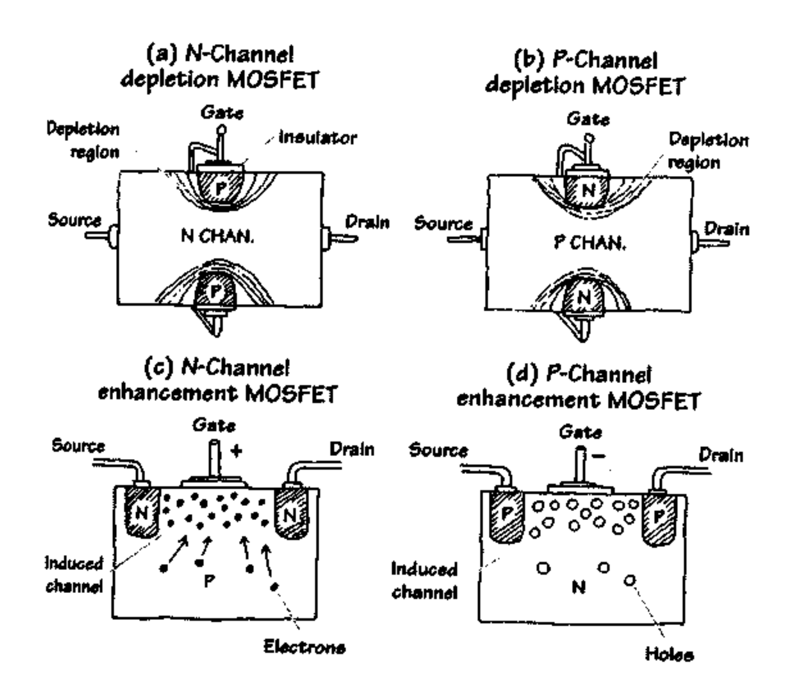
لترانزستورات MOSFET مقاومة تبادلية صغيرة مقارنة مع الترانزستورات ثنائية القطبية، ولذلك يكون ربح مضخمات MOSFET منخفضاً ولهذا السبب نادراً ما تستخدم ترانزستورات MOSFET في دارات مضخمات بسيطة، إلا إذا كان المضخم المطلوب يجب أن يحقق ممانعة دخل فوق عالية (ultra high impedance).



الشكل (63.4): رموز ترانزستورات MOSFET.

كيف تعمل ترانزستورات MOSFET

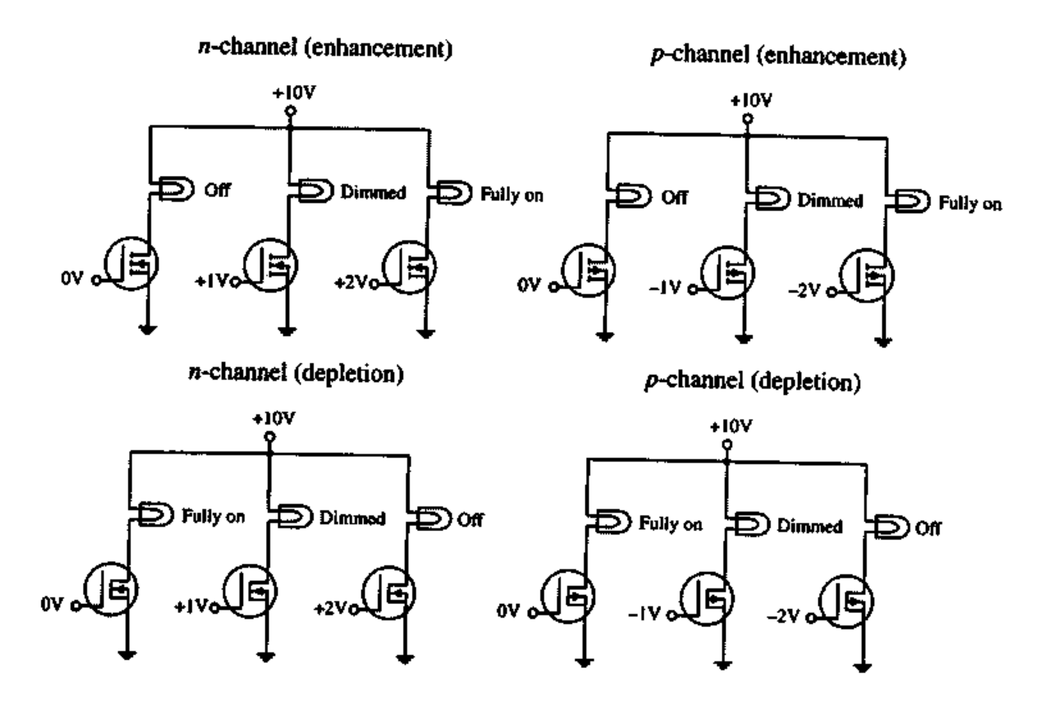
في ترانزستورات MOSFET من النوع المعزِّز أو المقلل يستخدم حقل كهربائي (electrical field) للتحكم بتدفق حوامل الشحنات عبر قنال العنصر بين المصرف والمنبع وهذا الحقل يتولد عن جهد البوابة. في ترانزستورات النوع المقلل تكون القنال ناقلة بسبب وجود حوامل شحنات فيها وحوامل الشحنات هي إلكترونات في القنال (n) وثقوب في القنال (p). عند تطبيق جهد بوابة سالب في ترانزستور قناله (n) فإن هذا الجهد يؤدي إلى تضيق القنال مما يؤدي إلى انخفاض تدفق الإلكترونات عبر القنال، انظر الشكل (64.4)، أما في ترانزستور قنال (p) فيتم استخدام جهد بوابة موجب لتخفيف تدفق الثقوب عبر القنال، انظر الشكل (4-64) وبالطبع فإن تضيق القنال ناتج عن الاستقطاب العكسي لمتصل البوابة قنال في الحالتين المذكورتين. أما ترانزستورات النوع المعزز، فإن قنالاتها تكون مقاومة في الوضع الطبيعي لمرور التيارات بسبب قلة حوامل الشحنات القابلة للحركة الموجودة فيها. عند تطبيق جهد موجب على بوابة ترانزستور قنال (n)، ($V_G > V_S$)، فإن إلكترونات المناطق ذات النوع (p) سوف تجذب إلى القنال ولذلك تزداد ناقلية القنال ويبدأ التيار بالمرور، انظر الشكل (64.4)، أما في ترانزستور MOSFET قنال (p) من النوع المعزز فيطبق جهد سالب على البوابة بالنسبة للمنبع مما يؤدي إلى جذب الثقوب إلى منطقة القنال (من المناطق n) فتزداد ناقلية القنال، انظر الشكل (64.4).



الشكل (64.4): أشكال توضيحية لشرح مبدأ عمل ترانزستورات MOSFET.

تطبيقات أساسية

تبيِّن الدارات المعطاة في الشكل (65.4) كيفية استخدام ترانزستورات MOSFET للتحكم بمرور التيار عبر مصابيح ضوئية. تختلف درجة التحكم بالإضاءة حسب الترانزستور الذي تستخدمه.

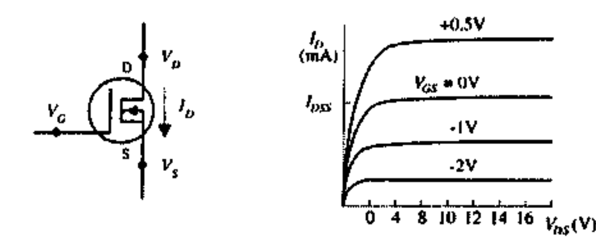


الشكل (65.4): دارات تحكم بالإضاءة.

تعاريف نظرية

يمكن اعتبار ترانزستورات MOSFET من النوع المقلل عند التعامل معها مثل ترانزستورات JFET مع ملاحظة أن مقاومات دخلها أعلى، وتلخص التعاريف والأشكال التالية كافة الأمور النظرية التي يجب أن تعرفها عن هذه الترانزستورات.

N-CHANNEL DEPLETION-TYPE MOSFET



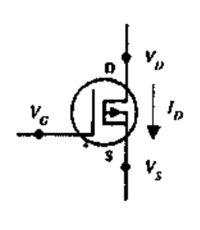
ترانزستورات MOSFET نوع مقلل قنال n

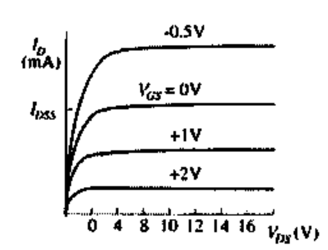
يبين الشكل (66.4) رمز هذا النوع من الترانزستورات ومميزة الفولت أمبير لخرجه، أي علاقة تيار المصرف (I_D) بالجهد (V_{DS}) عند قيم مختلفة للجهد (V_{GS}).

P-CHANNEL DEPLETION-TYPE MOSFET

ترانزستورات MOSFET نوع مقلل قنال p

في الشكل (66.4)، القسم السفلي يُعطى رمز هذا النوع من الترانزستور وتعطى كذلك مميزات خرج هذه الترانزستورات (I_D) كتابع لـــ (V_D) عند قيم مختلفة لـــ (V_{GS}).





الشكل (66.4): رموز ومميزات خرج ترانزستور MOSFET نوع مقلل.

تعاريف أساسية

المنطقة الأومية (ohmic region): في هذه المنطقة يعمل الترانزستور MOSFET كمقاومة.

المنطقة الفعالة (active region): وفي هذه المنطقة يتعلق تيار المصرف بجهد البوابة أما تأثير الجهد V_{DS} على التيار (عند قيمة محدّدة لـــ V_{GS}) فيكون طفيفاً جداً.

جهد القطع cutoff voltage ($V_{GS,off}$): يُرمز لهذا الجهد أيضاً بالرمز (V_P) ويسمى جهد الانقباض (pinch-off voltage) وهو الجهد الذي إذا طبق بين البوابة والمنبع فإنه يؤدي إلى نقل الترانزستور إلى القطع.

جهد الانهيار Breakdown voltage (BV_{DS}): وهو جهد بين المصرف والمنبع، إذا تم تجاوزه فإن التيار بين المصرف والمنبع يزداد بشكل انهياري كبير جداً، يؤدي إلى تخريب الترانزستور.

تيار المصرف عند استقطاب صفري (Drain current for zero Bias): يرمز لهذا التيار بالرمز I_{DSS}، وهو التيار الذي يمر في الترانزستور بين المصرف والمنبع عندما يكون V_{GS} مساوياً الصفر.

الناقلية التبادلية transconductance (g_m): وهي نسبة تغيرات تيار المصرف إلى تغيرات الجهد (V_{GS}) عند قيمة ثابتة للجهد V_{DS}، وهي تشابه الناقلية التبادلية ($\frac{1}{R_{tr}}$) في الترانزستور ثنائي القطبية.

علاقات وقوانين مفيدة لترانزستور MOSFET من النوع المقلل

علاقة تيار المصرف في منطقة المقاومة الأومية:

$$I_D = I_{DSS}[2(1-\frac{V_{GS}}{V_{GS,off}}).\frac{V_{DS}}{-V_{GS,off}}-(\frac{V_{DS}}{V_{GS,off}})^2]$$

علاقة تيار المصرف في المنطقة الفعالة:

$$I_D = I_{DSS}(1-\frac{V_{GS}}{V_{GS,off}})^2$$

مقاومة المصرف-منبع:

$$R_{DS} = \frac{V_{DS}}{I_D} \approx \frac{V_{GS,off}}{2I_{DSS}(V_{GS}-V_{GS,off})} = \frac{1}{g_m}$$

مقاومة حالة on بين المصرف والمنبع:

$$R_{DS,on} = constant$$

الجهد بين المنبع والمصرف:

$$V_{DS} = V_D - V_S$$

الناقلية التبادلية:

$$g_m = \left.\frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}\right|_{V_{DS}} = \frac{1}{R_{DS}}$$

$$= g_{m_0}(1-\frac{V_{GS}}{V_{GS,off}}) = g_{m_0}\sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}$$

الناقلية التبادلية عندما تكون البوابة موصولة مع المنبع:

$$g_{m_0} = \frac{2I_{DSS}}{V_{GS,off}}$$

في ترانزستور قنال (n) تكون ($V_{GS,off}$) سالبة، وفي ترانزستور قنال (p) تكون ($V_{GS,off}$) موجبة.

$V_{GS,off}$ وI_{DSS} هي عبارة عن معاليم (معطيات)، ويمكن الحصول على قيمها لترانزستور معيَّن من جدول مواصفات العنصر. وفيما يلي بعض القيم النموذجية لبارامترات ترانزستور JFET:

I_{DSS}: يتراوح بين 1mA و1A.

$V_{GS,off}$: تتراوح بين (-0.5V) و(-10V) لترانزستور قنال n، وبين (+0.5V) و(+10V) لترانزستور قنال p.

$R_{DS,on}$: من 10Ω إلى 1000Ω.

BV_{DS}: من 6 إلى 50 فولت.

أما g_m عند (1mA) فتتراوح قيمها بين (500) و3000µmho.

معلومات فنية وعلاقات لترانزستورات MOSFET من النوع المعزز

يجب تعلّم بعض المفاهيم والقوانين لمعرفة سلوك ترانزستور MOSFET من النوع المعزز، وفيما يلي أهم التعاريف والعلاقات مع رموز هذه الترانزستورات ومميزات خرجها (الشكل 67.4).

المنطقة الأومية: وهي منطقة يعمل فيها الترانزستور كمقاومة.

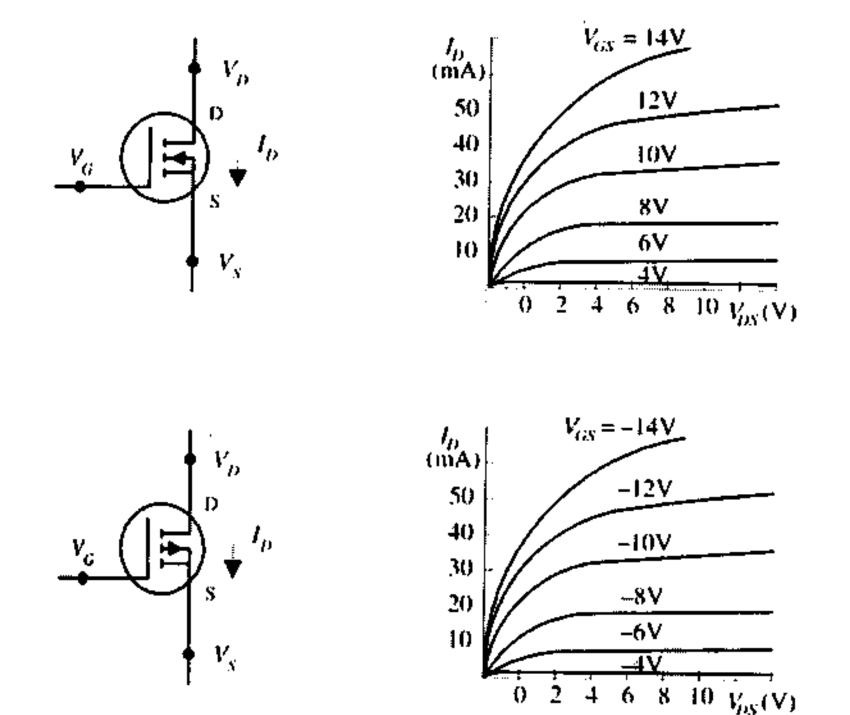
المنطقة الفعالة: وهي منطقة يتعلق فيها التيار (I_D) بالجهد V_{GS} وعند قيمة ثابتة لـ V_{GS} يكون تأثير (V_{DS}) على التيار (I_D) طفيفاً جداً.

جهد العتبة ($V_{GS,th}$) Threshold voltage: وهو الجهد بين البوابة والمنبع الذي يبدأ عنده الترانزستور بنقل التيار.

جهد الانهيار (BV_{DS}) Breakdown voltage: هو جهد إذا طبق بين المنبع والمصرف فإن تيار المصرف يزداد كثيراً إلى درجة تؤدي إلى تخريب الترانزستور.

تيار المصرف الموافق لجهد استقطاب معيَّن ($I_{D,on}$). هو التيار الذي يمر بين المصرف والمنبع عند قيمة معينة للجهد V_{GS}. تعطى في نشرات المعطيات قيمة V_{GS} وقيمة I_D الموافقة لها.

الناقلية التبادلية (gm): هي نسبة تغيرات تيار المصرف إلى تغيّرات (V_{GS}) عند قيمة ثابتة لـ V_{DS}. وهي تشابه الناقلية التبادلية ($1/R_{tr}$) للترانزستورات ثنائية القطبيّة.



الشكل (67.4): رموز ومميزات خرج ترانزستورات MOSFETs نوع معزّز.

علاقة (معادلة) تيار المصرف في المنطقة الأومية:

$$I_D = k[2(V_{GS} - V_{GS,th})V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2]$$

علاقة تيار المصرف في المنطقة الفعالة:

$$I_D = k.(V_{GS} - V_{GS,th})^2$$

بارامتر التركيب (construction parameter):

$$k = \frac{I_D}{(V_{GS} - V_{GS,th})^2} = \frac{I_{D,on}}{(V_{GS,on} - V_{GS,th})^2}$$

الناقلية التبادلية:

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}\bigg|_{V_{DS}} = \frac{1}{R_{DS}}$$
$$= 2k(V_{GS} - V_{GS,th}) = 2\sqrt{kI_D} = 2\sqrt{kI_D}$$
$$= g_{m_0}\sqrt{\frac{I_D}{I_{Do}}}$$

مقاومة قنال المنبع-مصرف:

$$R_{DS} = 1/g_m$$
$$R_{DS} = \frac{V_{G1} - V_{GS,th}}{V_{G2} - V_{GS,th}} R_{DS1}$$

تتناسب قيمة البارامتر k (بارامتر التركيب) مع نسبة (العرض/الطول) لقنال الترانزستور وتتعلق بالحرارة وتحسب من المعادلة المعطاة أعلاه.

$V_{GS,th}$ موجب لترانزستور قنال (n)، وسالب لترانزستور قنال (p). فيما يلي بعض القيم النموذجية لبارامترات الترانزستورات.

$I_{DS,on}$: من 1mA إلى 1A.

$R_{DS,on}$: من 1Ω إلى 10kΩ.

$V_{GS,off}$: من 0.5 إلى 10v.

$BV_{DS(off)}$: من 6 إلى 50v.

$BV_{GS,off}$: من 6 إلى 50v.

تعتبر $V_{GS,th}$، $I_{D,on}$ و g_m معطيات عند قيمة معينة لـ I_D ويمكن معرفة قيمها من جدول مواصفات العنصر. R_{DS1} هي مقاومة معطاة عند قيمة معرّفة (V_{G1})، أما R_{DS2} فهي المقاومة التي تُحسب عند قيمة أخرى (V_{G2}).

مسائل

ترانزستور MOSFET من النوع المقلل (depletion) له المعطيات التالية:

I_{DSS} = 10mA; $V_{GS,off}$ = -4V

أوجد قيم I_D، g_m، R_{DS} عندما تكون V_G = -2V و V_G = +2V.

افرض أن الترانزستور يعمل في المنطقة الفعالة.

الحل:

عندما يكون (V_G = -2V) نحسب التيار I_D من العلاقة:

$$I_D = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,off}})^2 = 10mA(1 - \frac{-2V}{-4V})^2 = 2.5mA$$

من أجل إيجاد g_m نُوجد g_{mo} أولاً:

$$g_{m_0} = \frac{2I_{DSS}}{V_{GS,off}} = -\frac{2(10mA)}{-4V} = 0.005mho = 5000\mu mho$$

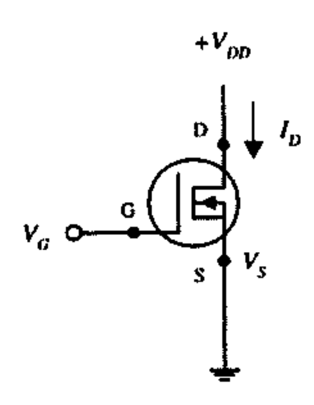
الآن يمكنك حساب g_m:

$$g_m = g_{m_0}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_{GS,off}}\right) = 5000\mu mho\left(1-\frac{-2}{-4}\right) = 2500\mu mho$$

$$R_{DS} = 1/g_m = 400\Omega$$

وبإجراء نفس الحسابات من أجل $V_{GS} = +1V$ نحصل على النتائج التالية:

$I_D = 15.6mA,\ g_m = 6250,\ R_{DS} = 160\Omega$



الشكل (68.4): ترانزستور MOSFET نمط مقلل قنال (n).

مسألة (2):

ترانزستور MOSFET من النوع المعزز له البارامترات التالية:

$V_{GS,th} = +2v;$

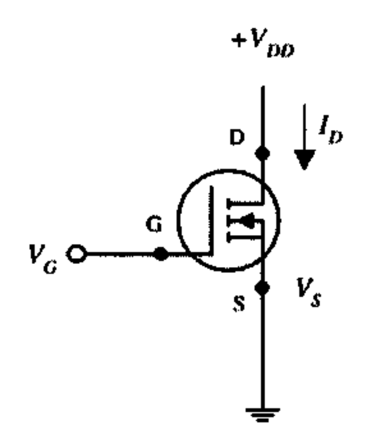
وعند V_{GS} يساوي $(+4V)$ كان $I_D = 12mA$. أوجد k, g_m, R_{DS} بفرض أن الترانزستور يعمل في المنطقة الفعالة.

الحل: من أجل حساب k استخدم معادلة تيار المصرف في المنطقة الفعالة:

$I_D = k\,(V_{GS} - V_{GS,th})2$

ومن هذه المعادلة تحصل على:

$$k = \frac{I_D}{(V_{GS} - V_{GS,th})^2} = \frac{12mA}{(4V - 2V)^2} = 0.003mho/V = 3000\mu mho/V$$



الشكل (69.4): رمز ترانزستور MOSFET قنال (n) من النوع المعزز.

ومن أجل إيجاد g_m، استخدم العلاقة التالية:

$$g_m = 2k(V_{GS} - V_{GS,th}) = 2\sqrt{k.I_D}$$
$$= 2\sqrt{(3000\mu mho/v)(12mA)} = 0.012mho = 12{,}000\mu mho$$

وعندها يمكن حساب المقاومة R_{DS} من العلاقة:

$R_{DS} = (1/gm) = 83\Omega$

مسألة (3):

في دارة، الشكل (70.4) يوجد ترانزستور MOSFET قنال (n) من النوع المعزز له $I_{DSS} = 10mA$، $V_{GS,off} = -4V$. المقاومة $R_D = 1k\Omega$ وجهد التغذية المستمر $V_{DD} = +20V$. أوجد الربح (Vout / Vin).

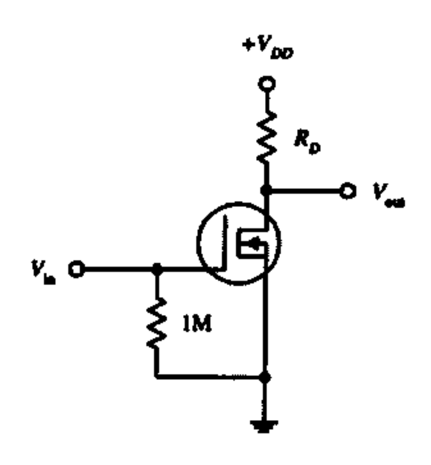
يمكن باستخدام قوانين كيرشوف وأوم الحصول على المعادلات التالية:

$$V_{DD} = V_{DS} + I_D R_D$$

$$V_{DD} = V_D + I_D R_D$$

وفي المعادلة الأخيرة تلاحظ أن $V_{DS} = V_D$ وذلك لأن المنبع موصول مع الأرضي:

$$V_{DS} = V_D - V_S = V_D - 0 = V_D$$



الشكل (70.4): دارة المسألة الثالثة.

المقاومة (1MΩ) هي مقاومة استقطاب ذاتي (self-biasing resistor) وتستخدم هذه المقاومة لتعويض تيارات التسريب (leakage currents) وغيرها من البارامترات التي يمكن أن تقود الــ MOSFET إلى عدم الاستقرار. يمكن إهمال هبوط الجهد على هذه المقاومة لأن تيارات التسريب صغيرة جداً (من مرتبة النانو أمبير nA أو البيكو أمبير pA).
بفرض عدم وجود إشارة دخل يمكن اعتبار $I_D = I_{DSS}$ وهذا يعني أن:

$$V_D = V_{DD} - I_{DSS}.R_D$$

$$= 20V - (10mA)(1k\Omega) = 10V$$

استخدم المعادلة التالية من أجل حساب الربح:

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} = g_{m_0} R_D$$

$$g_{m_0} = -\frac{2I_{DSS}}{V_{GS,off}} = -\frac{2(10mA)}{-4V} = 5000\mu mho$$

وبتعويض هذه القيمة في معادلة الربح تحصل على:

$$Gain = (5000\mu mho)(1k\Omega) = 5$$

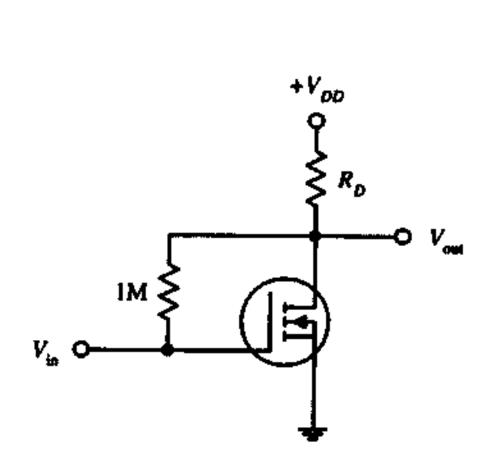
مسألة (4):

في دارة الشكل (71.4) يُستخدم ترانزستور MOSFET قنال (n) من النوع المعزِّز له ($k = 1000\mu mho/V$) و$V_{GS,th} = 2V$. ومعطيات الدارة هي: $V_{GS} = 5V$ و$V_{DD} = 20V$. احسب R_D واحسب الربح.

الحل: نوجد تيار المصرف من العلاقة:

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS,th})^2$$

$$= (1000\mu mho/V)(5V - 2V)^2 = 9mA$$



الشكل (71.4): دارة المسألة الرابعة.

من أجل حساب R_D نستخدم قانون أوم:

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{(20 - 10)V}{9mA} = 1100\Omega$$

وظيفة المقاومة 1MΩ في هذه الدارة هي نفس وظيفة المقاومة 1MΩ في دارة المسألة السابقة. من أجل إيجاد الربح يجب معرفة قيمة g_m:



$$g_m = 2k(V_{GS} - V_{GS,th}) = 2(1000\mu mho/V)(5V - 2V)$$

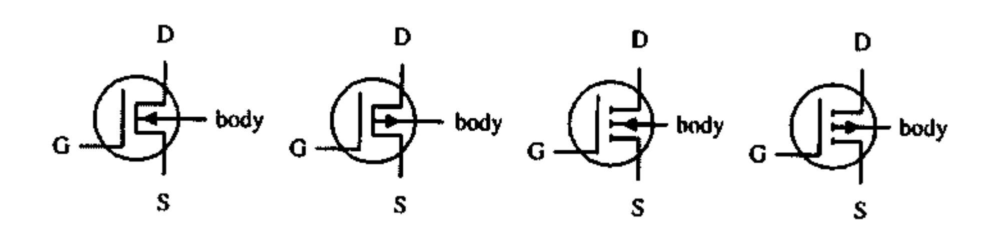
$$= 6000\mu mho$$

نعوِّض قيمة (g_m) في معادلة الربح:

$$Gain = (V_{out} / V_{in}) = g_m R_D = (6000\mu mho)(1100\Omega) = 6.6$$

اشياء هامة يجب ان تعرفها عن ترانزستورات MOSFET

لترانزستور MOSFET أربع أرجل، وتسمى الرجل الرابعة للترانزستور باسم رجل الجسم (طرفية الجسم body terminal)، وتشكل هذه الرجل متصلاً ديودياً (diode junction) مع القنال بين المصرف والمنبع ويجب أن توصل هذه الرجل إما مع المنبع، أو مع أية نقطة في الدارة جهدها أكثر سلبية من المنبع (في العناصر ذات القنال n)، أو مع نقطة أكثر إيجابية من المنبع في العناصر ذات القنال (p). إذا فُصلت هذه الرجل والتي تسمى أيضاً باسم القاعدة (base) عن المنبع ووصلت إلى جهد يختلف عن جهد المنبع فإن ذلك يؤدي إلى إزاحة الجهد ($V_{GS,th}$) بقيمة تساوي ($\sqrt{V_{BS}}/2$) وباتجاه يؤدي إلى نقصان تيار المصرف عند قيمة معطاة لـ (V_{GS}). أحياناً يكون من الضروري إزاحة جهد العتبة من أجل موازنة (معاكسة) تأثير تيارات التسريب وكذلك تأثير السعات وقطبيات الإشارات. تستخدم رجل القاعدة في ترانزستورات MOSFET لتحديد نقطة عمل الترانزستور بتطبيق إشارة متناوبة متزايدة على بوابة الترانزستور.



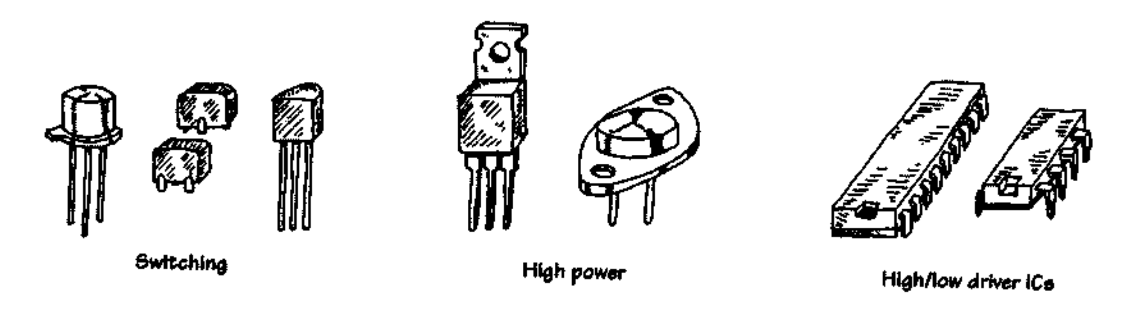
الشكل (72.4): نماذج ترانزستورات MOSFET وتسميات أرجلها.

ترانزستورات MOSFET والشحنات الساكنة

تعتبر ترانزستورات MOSFET ضعيفة من حيث مقاومتها للتعطل السريع وذلك بسبب سهولة تخرُّب العازل الأوكسيدي بين البوابة والقنال بالقذف الإلكتروني الذي ينتج عن الأجسام ذات الشحنات الساكنة، فمثلاً يمكن تخرُّب هذا العازل ببساطة إذا لمست بوابة الترانزستور بعد أن تكون قد مشيت على سجادة، فهذه الشحنة التي اكتسبتها من خلال المشي على السجادة قد تجعل جهد جسمك مساوياً عدة آلاف الفولت، ولكن تيار التفريغ ليس تياراً كبيراً ومع ذلك فإنه كاف لتخريب العازل لأن طبقة الأوكسيد رقيقة جداً (إن سعة البوابة قنال من مرتبة بضعة pF) ولذلك فإن تياراً صغيراً يمكن أنْ يُخرِّب الترانزستور. عند تركيب ترانزستورات MOSFET يجب تفريغ كافة الشحنات الساكنة من أدوات العمل، وفي الفصل الرابع عشر من هذا الكتاب سوف تجد توجيهات حول كيفية التعامل مع العناصر الإلكترونية التي تتأثر بالشحنات الساكنة.

أنواع ترانزستورات MOSFET

تتوفر ترانزستورات MOSFET، مثل غيرها من الترانزستورات، إما بغلاف بلاستيكي أو بغلاف معدني. تُزوَّد ترانزستورات MOSFET الاستطاعية بلسان (عروة) معدني كي يتم بواسطته تثبيت الترانزستور على جسم التبريد. تتوفر دارات تكاملية من نوع MOSFET وتستخدم للقيادة على وضعيات (High) أو (Low) وتحوي هذه الدارات ضمنها على ترانزستورات MOSFET مستقلة ويمكن أن تتعامل مع الإشارات الرقمية. وهذه الدارات المتكاملة تكون عادة من الأنواع التي لها صفان متناظران من الأرجل DIP. البارامترات التي يجب أن تنتبه إليها عند شراء ترانزستور MOSFET هي جهود الانهيار و $I_{D,max}$، $R_{DS(on),max}$، وتبديد الاستطاعة (power dissipation) وسرعة الفتح والإغلاق (switching speed)، والحماية من تفريغ الشحنات الساكنة.

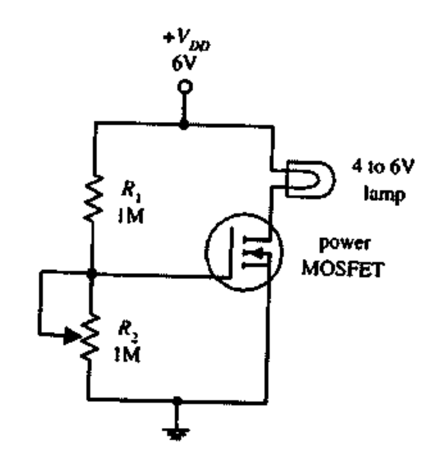


الشكل (73.4): اشكال ترانزستورات MOSFET.

تطبيقات

متحكم بالإضاءة

يُستخدم ترانزستور MOSFET قنال (n) من النوع المعزز في دارة الشكل (74.4) للتحكم بتدفق التيار عبر مصباح (lamp). يتم ضبط جهد البوابة بواسطة مقاومة مقسم الجهد R2 وبذلك يتم ضبط تيار المصرف المار عبر المصباح.

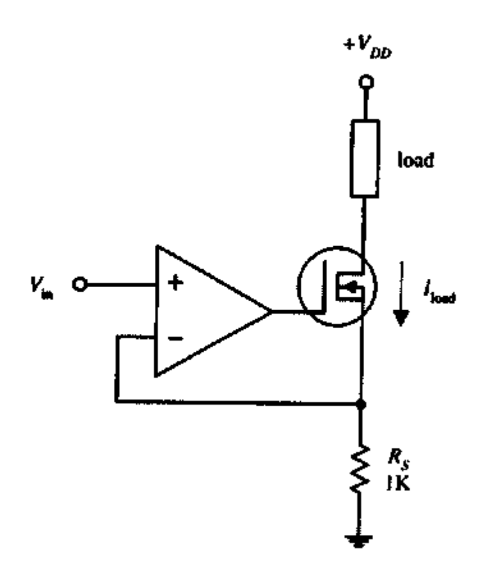


الشكل (74.4): دارة متحكم بالإضاءة بواسطة MOSFET.

منبع تيار

في هذه الدارة (الشكل 75.4) يُستخدم مضخم عملياتي (op amp) مع ترانزستور MOSFET لتكوين منبع تيار عالي الدقة (نسبة خطأ أقل من واحد بالمائة 1%). يمرر الترانزستور تيار الحمل، ويطبق الجهد الهابط على المقاومة (Rs) على المدخل العاكس للمضخم العملياتي. يقارن جهد المدخل العاكس للمضخم العملياتي مع جهد دخل (Vin) مطبقٍ على المدخل غير العاكس. إذا تغيَّر تيار الحمل زيادةً أو نقصاناً فإن جهد خرج المضخم العملياتي سوف يتغير ويتغير تبعاً لذلك جهد بوابة الترانزستور ويتم التحكم بالتيار. تعتبر هذه الدارة أكثر دقة وموثوقية من دارات منابع التيار البسيطة التي نستخدم فيها ترانزستورات ثنائية القطبية. قيمة تيارات التسريب في هذه الدارة صغيرة جداً ويتحدد تيار الحمل وفق قانون أوم (ووفق قوانين المضخم العملياتي التي سنناقشها في الفصل السابع).

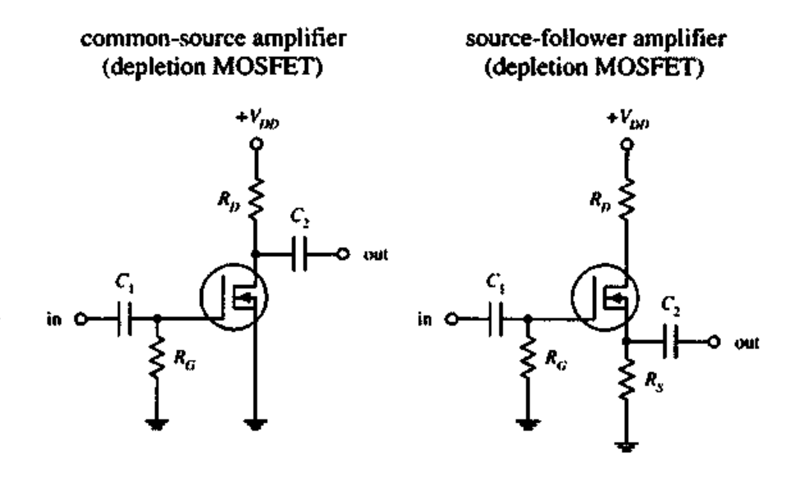
$$I_{load} = \frac{V_{in}}{R_S}$$



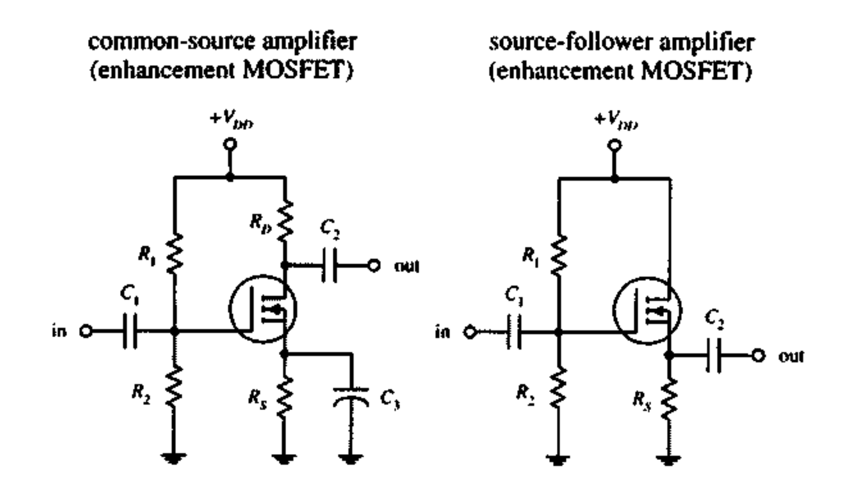
الشكل (75.4): دارة منبع تيار.

المضخمات

يمكن تشكيل مضخمات بوصلة تابع منبعي وبوصلة منبع مشترك باستخدام ترانزستورات MOSFET من الأنواع المقللة (depletion) والمعززة (enhancement)، وتعتبر المضخمات التي تبنى على ترانزستورات MOSFET مقللة مشابهة لمضخمات الترانزستورات الحقلية JFET التي نُوقشت سابقاً ولكن ممانعات دخل مضخمات ترانزستورات MOSFET أعلى. تقوم مضخمات MOSFET المعززة من حيث المبدأ بنفس عمل مضخمات MOSFET المقللة إلا أنها تحتاج إلى مقسمات جهد من أجل ضبط جهد البوابة (في الترانزستورات MOSFET المقللة تكفي مقاومة واحدة لضبط جهد البوابة). في دارة مضخم المنبع المشترك يكون الخرج معاكساً بالصفحة للدخل. يمكن فهم وظائف المكثفات والمقاومات الموجودة في دارات مضخمات الشكل (76.4) بالعودة إلى دارات المضخمات المشروحة سابقاً.



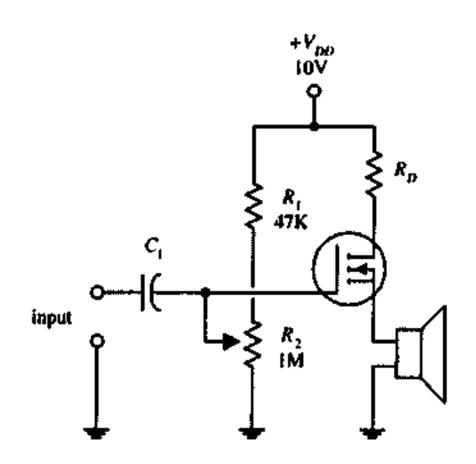
الشكل (76.4): دارات مضخمات باستخدام ترانزستورات MOSFET.



تابع الشكل (76.4): دارات مضخمات باستخدام ترانزستورات MOSFET.

مضخم صوتي

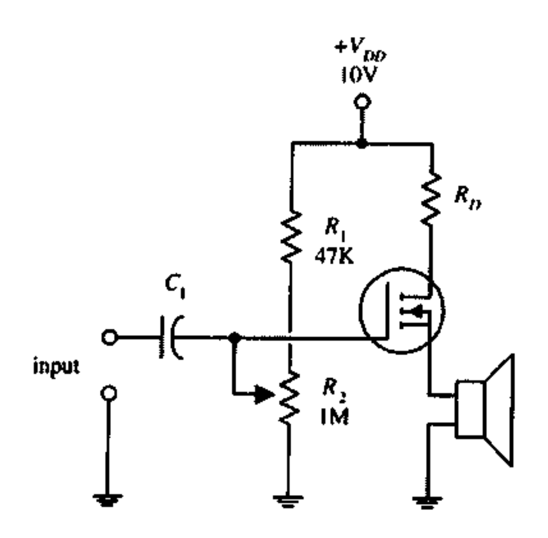
يستخدم في هذه الدارة ترانزستور MOSFET قنال (n) من النوع المعزز لتكبير إشارة صوتية يتم الحصول عليها من ميكرفون عالي الممانعة، وتطبق إشارة خرج المضخم على مصوات (speaker). المكثف C1 هو مكثف ربط متناوب، أما R2 فهي مقاومة مقسم جهد تستخدم للتحكم بالربح وبالتالي التحكم بشدة الصوت الصادر عن المصوات (volume).



الشكل (77.4): دارة مكبر صوت.

دارة قيادة حاكمة (تحويل من رقمي إلى تشابهي)

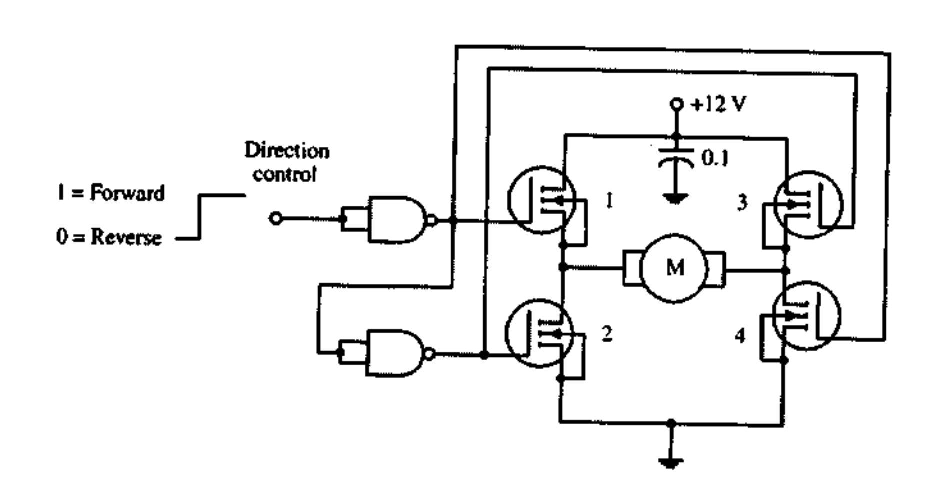
تبيِّن دارة الشكل (78.4) كيفية استخدام ترانزستور MOSFET قنال (n) من النوع المقلل كأداة ملاءمة بين دارة رقمية ودارة تشابهية (analog). وفي هذه الدارة تستخدم بوابة AND لقيادة الترانزستور إلى حالة النقل (conduction) من أجل تفعيل الحاكمة. إذا كان المدخلان (A) و(B) على حالة (High) فإن الحاكمة تغيِّر وضعيات تماسها إلى الوضع (2)، أما باقي الحالات الأخرى الممكنة للمداخل وهي (high; low)، (low; high)، (low; low) فإنها تبقي تماسات الحاكمة على الوضع (1). يعتبر ترانزستور MOSFET مناسباً جداً للاستخدام في دارات الملاءمة بين الإشارات الرقمية والتشابهية، وذلك لأن مقاومة دخله العالية جداً وتيار دخله المنخفض يجعلانه مناسباً من أجل قيادة الدارات التشابهية عالية الجهد أو التيار دون استهلاك أي تيار من الدارة المنطقية التي تقوده.



الشكل (78.4): دارة قيادة حاكمة بواسطة MOSFET.

التحكم باتجاه دوران محرك تيار مستمر

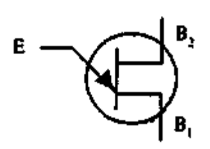
تبيِّن دارة الشكل (79.4) استخدام ترانزستورات MOSFET للتحكم بجهة دوران محرك تيار مستمر وفي هذه الدارة تستخدم إشارة دخل رقمية للتحكم باتجاه الدوران. عندما تكون إشارة الدخل في حالة (high) فإن بوابة NAND العلوية تعطي خرجاً (low) وتقود بذلك الترانزستورات (1) و(4) إلى حالة (on) وفي نفس الوقت يكون خرج بوابة NAND السفلية على وضع (high) ويقود الترانزستورات (2) و(3) إلى حالة (off) ويكون اتجاه مرور التيار في الدارة من موجب الـ (+12V) عبر الترانزستور (1) فالمحرك ثم عبر الترانزستور (4) فالأرض ويدور المحرك باتجاه معيَّن. عندما تكون إشارة الدخل على حالة (low) يكون خرج بوابة NAND العلوية (high) ويقود الترانزستورات (1) و(4) إلى القطع (off)، أما خرج بوابة NAND السفلية فيكون (low) ويقود الترانزستورات (2) و(3) إلى وضع (on) ويمر تيار الدارة من موجب الـ (12V) إلى الترانزستور (3) فالمحرك فالترانزستور (2) إلى الأرض (بعكس جهة مروره عبر المحرك في الحالة الأولى) ويدور المحرك بعكس الاتجاه السابق.



الشكل (79.4): دارة تحكم بجهة دوران محرك dc.

5.3.4 الترانزستورات وحيدة المتصل

الترانزستورات وحيدة المتصل هي عناصر ذات ثلاث أرجل وتستخدم كمفاتيح متحكم بها جهدياً (ولا تستخدم كمضخمات) ومبدأ عمل هذه الترانزستورات بسيط نسبياً، فعندما لا يكون هناك فرق جهد بين الباعث (E) وإحدى القاعدتين (B1) أو (B2) فإن تياراً صغيراً جداً يمر بين (B1) و(B2). عند تطبيق جهد موجب كاف (جهد قدح trigger voltage) على الباعث بالنسبة إلى القواعد فإن تياراً كبيراً يمر عبر الباعث ويجمع هذا التيار مع التيار الصغير المار بين (B2) و(B1) وبذلك يصبح تيار (B1) أكبر. وبعكس الترانزستورات التي دُرست سابقاً حيث كان قطب التحكم لا يساهم في إضافة أي تيار إلى طرف الخرج، فإن تيار باعث الترانزستور وحيد المتصل هو السبب الأساسي في تشكيل تيار خرج كبير.

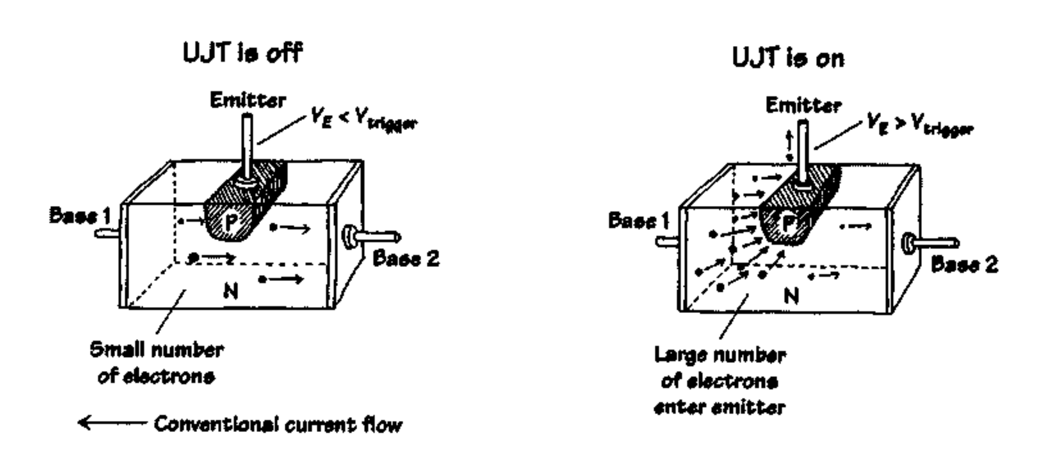


الشكل (80.4): رمز الترانزستور وحيد المتصل.

كيف يعمل الترانزستور وحيد المتصل

يبيّن الشكل (81.4) بنية الترانزستور وحيد المتصل التي تتكون من قطعة من مادة نصف ناقلة نوع (n) مع ما يشبه الفقاعة في الوسط من مادة نصف ناقلة نوع (p). تشكل إحدى نهايات القطعة (n) القاعدة الأولى (B1) والنهاية الأخرى القاعدة الثانية (B2)، أما الفقاعة فتشكل الباعث (E). وفيما يلي شرح مبسَّط لمبدأ العمل.

في حال عدم تطبيق جهد على الباعث يمر تيار صغير جداً بين القاعدة (B1) و(B2)، وعادة ما تكون مناطق القواعد (B1) و(B2) ذات مقاومات عالية (مقاومة كل واحدة منها عدة آلاف الأومات)، عند تطبيق جهد عال على الباعث يُصبح المتصل (pn) في حالة استقطاب أمامي (تماماً كالاستقطاب الأمامي لديود عادي) وهذا يسمح لعددٍ أكبر من إلكترونات القاعدة (1) بالخروج عبر الباعث، وبما أن الاتجاه الاصطلاحي لحركة التيار هو عكس جهة حركة الإلكترونات فإنه يمكنك القول بأن تياراً موجباً يتدفق عبر الباعث ويجمع مع تيار القنال مشكلاً تياراً أكبر يمر من القاعدة (B1).



الشكل (81.4): بنية ترانزستور UJT.

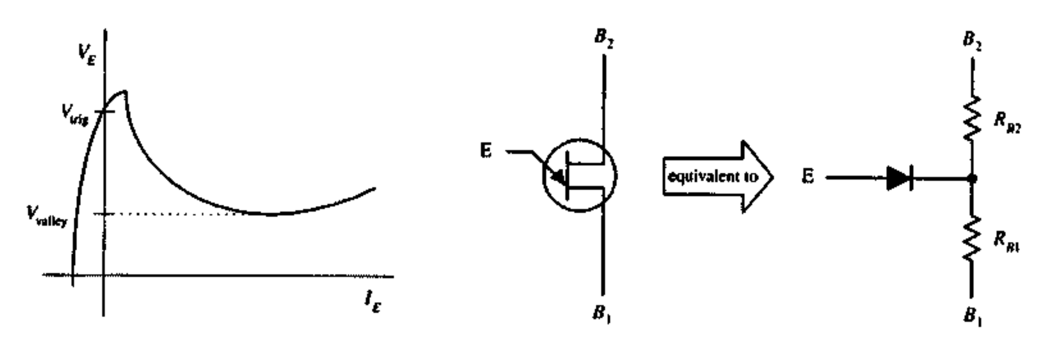
معلومات فنية

يبيِّن الشكل (82.4) الرسم البياني لـــ (V_E) كتابع لـــ (I_E) لترانزستور UJT بالإضافة إلى الدارة المكافئة للـــ UJT. إذا كانت القاعدة الأولى (B1) مؤرضة وطبق جهد على الباعث، فإن هذا الجهد لن يكون له تأثير على الناقلية (لا يزيد الناقلية بين قاعدة والأخرى) إلا إذا تجاوزت قيمة هذا الجهد حداً معيناً يسمى الجهد الحرج (critical voltage) أو جهد القدح (triggering voltage)، ويُعطى جهد القدح بالعلاقة التالية:

$$V_{trig} = \frac{R_{B_1}}{R_{B1} + R_{B_2}} V_{B_2} = \eta V_{B_2}$$

R_{B1} في هذه العلاقة هي مقاومة بين رجل القاعدة الأولى والقنال وكذلك الأمر بالنسبة لـــ R_{B2}. عندما يكون الباعث مفتوحاً فإن المقاومة الكلية للقنال تتجاوز عدة آلاف الأوم، وعادة تكون R_{B1} أكبر قليلاً من R_{B2} وعندما تصل قيمة الجهد المطبق على الباعث إلى جهد القدح فإن المتصل (pn) يصبح في حالة استقطاب أمامي (ويبدأ الديود الموجود في الدارة المكافئة بالتمرير) ويمر تيار من الباعث إلى القنال. ولكن كيف نحدِّد المقاومات R_{B1} وR_{B2}؟ هل تُعطى هذه المقاومات من قِبل الجهات الصانعة؟ والجواب على الأغلب لا، ولكن الجهات الصانعة تعطي بارامتراً يُسمى (η) وهو نسبة $\frac{R_{B_1}}{R_{B_1} + R_{B_2}}$ وذلك باعتبار الباعث لا يمرر. تقع قيمة (η) بين (0) و(1) وقيمتها النموذجية تساوي (0.5).





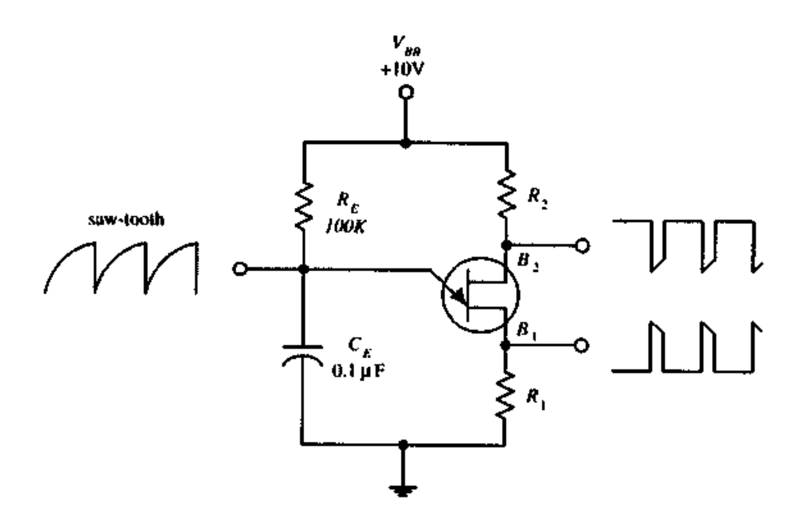
الشكل (82.4): الدارة المكافئة لترانزستور UJT وعلاقة V_E بـ (I_E).

تطبيق نموذجي (هزاز الاسترخاء)

تستخدم ترانزستورات UJT على الأغلب في دارات الهزازات، وفي الشكل (83.4) يُستخدم ترانزستور UJT مع بعض المقاومات ومكثف لتكوين هزاز استرخاء يُعطي ثلاثة أنواع من إشارات الخرج. خلال العمل يُشحن المكثف (C_E) عبرِ المقاومة (R_E) حتى يصبح جهد المكثف مساوياً جهد القدح للترانزستور وعند تجاوز قيمة جهد القدح بمقدار طفيف جداً تزداد ناقلية الوصلة من (E) إلى (B1) بشكل حاد وهذا يسمح للتيار بالمرور من المكثف إلى الباعث إلى منطقة الباعث–قاعدة أولى (B1) ثم إلى الأرض، ويفقد المكثف (C_E) شحنته فجأة فينخفض جهد الباعث بشكل مفاجئ إلى ما دون مستوى القدح، وتتكرر الدورة من جديد. أشكال الجهود التي تتشكل على أطراف الترانزستور مبينة على الشكل. يتحدد تردد الاهتزاز بدور الشحن والتفريغ ويُعطى بالعلاقة التالية:

$$f = \frac{1}{R_E C_E \ln[1/(1-\eta)]}$$

مثلاً إذا كان $R_E = 100k\Omega$، $C_E = 0.1\mu F$ و$\eta = 0.61$ عندها يكون $f = 106Hz$.



الشكل (83.4): دارة هزاز استرخاء.

أنواع ترانزستورات UJT

دارات التقطيع الأساسية

تستخدم ترانزستورات UJT في الهزازات وفي دارات التوقيت وكذلك في دارات كشف المستوى (level detecting circuits).

القيم النموذجية لبعض بارامترات الترانزستور هي:

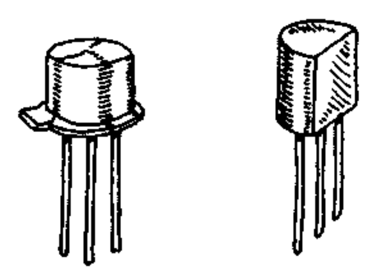
التيار I_E: حوالي 50mA.

الجهد المسموح بين القواعد V_{BB}: من 35V إلى 55V.

تبديد الاستطاعة: 500mW.

إن ترانزستورات PUT هي ترانزستورات مشابهة لترانزستورات UJT، إلا أن R_{BB} وI_V (مستوى تيار الوادي valley current level) وI_P (مستوى التيار الأعظمي) وη (نسبة التعادل الداخلي intrinsic standoff ratio) يمكن أن تبرمج بواسطة مقسم جهد خارجي ويعتبر ذلك مهماً جداً من أجل القضاء على عدم استقرارية الدارة. يختلف رمز ترانزستورات PUT بشكل كبير عن رمز ترانزستورات UJT (انظر الشكل 85.4). وكذلك فإن أسماء الأطراف مختلفة، حيث تسمى أطراف ترانزستور PUT بالأسماء مصعد (anode) ومهبط (cathode) وبوابة (gate).

BASIC SWITCHING



الشكل (84.4): أشكال ترانزستورات UJT.

PROGRAMMABLE (PUTs)
anode
gate
cathode
Anode
Gate
Cathode

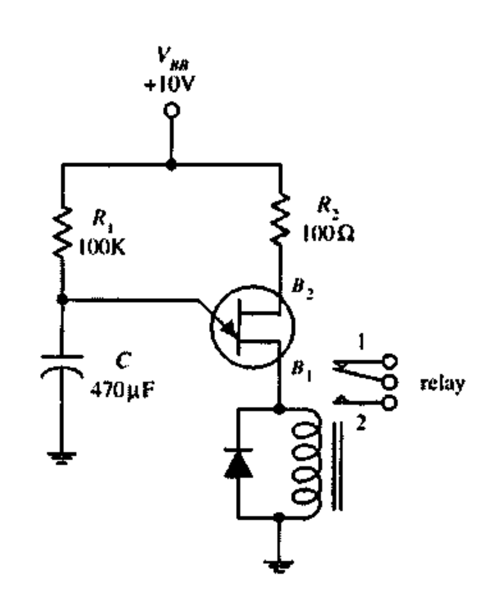
الشكل (85.4): شكل ورمز ترانزستور PUT.

تستخدم ترانزستورات PUT لبناء دارات المؤقتات وكذلك لتشكيل دارات التحكم بالصفحة عالية الربح (high-gain phase control circuits). وفي دارات الهزازات (oscillators) ونبيِّن فيما يلي بعض الدارات التي توضح تطبيقات ترانزستورات الـــ UJTs والـــ PUTs.

تطبيقات

دارة قيادة حاكمة/مؤقت

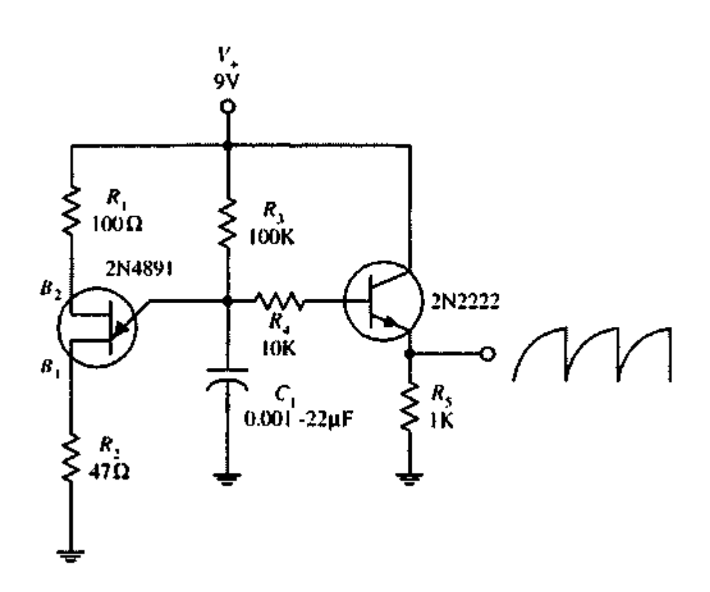
تقود الدارة المعطاة في الشكل (86.4) الحاكمة وتجعلها تغيِّر وضعيات تماسها بشكلٍ متعاقب ومتكرر. يُشحن المكثف (C) عبر المقاومة (R1) من مصدر الجُهد (VBB = 10V) وعندما يصبح جهد المكثف مساوياً جهد القدح تزداد ناقلية الوصلة (E) إلى (B1) ويمر تيار عبر ملف الحاكمة وتغيِّر الحاكمة وضع التماس إلى الموقع (2)، وعندما يفرِّغ المكثف ينخفض الجهد على الباعث (E) إلى ما دون مستوى القدح ويُقطع الترانزستور (يعود إلى حالة off) وتعود الحاكمة إلى حالة الراحة ويرجع تماس الحاكمة المتحرك إلى الوضع (1). تتحكم المقاومة (R1) بمعدَّل شحن المكثف كما يتحدد مقدار جهد القدح بسعة المكثف (C). إذن (C) يؤثر أيضاً على معدَّل الشحن.



الشكل (86.4): دارة مؤقتة/قيادة حاكمة.

مولد جهد تصاعدي بواسطة مضخم

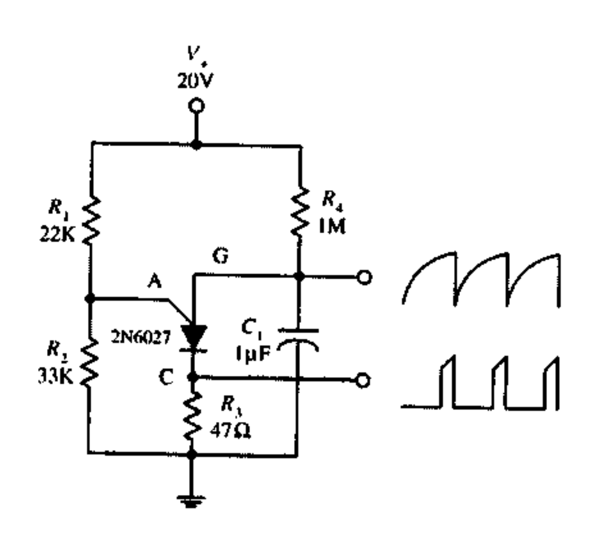
في هذه الدارة (الشكل 87.4) يستخدم ترانزستور UJT مع ترانزستور عادي ومكثف ومجموعة من المقاومات لتوليد جهد سن منشاري (sawtooth) ومولد سن المنشار هذا يمكن التحكم بربحه مع الإشارة هنا إلى أن ربح المولد يتحدد بدارة الترانزستور ثنائي القطبية، أما التردد فيتعلق بالمكثف (C1) والمقاومة (R3). يُطبق جهد المكثف (C1) على قاعدة الترانزستور ثنائي القطبية، أما الخرج فيؤخذ من باعث الترانزستور ثنائي القطبيّة. لا داعي هنا لشرح مبدأ العمل لأنه مشروح في فقرة هزاز الاسترخاء فالجهد الذي يتشكل على المكثف (C1) أثناء عمل هزاز الاسترخاء هو تقريباً جهد سن منشاري.



الشكل (87.4): دارة مولد نبضات سن منشارية.

هزاز استرخاء باستخدام PUT

في هذه الدارة يُبرمج ترانزستور PUT بواسطة مقسم الجهد R1 وR2، وذلك من أجل ضبط جهد القدح المرغوب وتيار المصعد على القيم المناسبة.



الشكل (88.4): دارة هزاز استرخاء باستخدام PUT.

تشكل المقاومات (R1) و(R2) مقسم جهد يحدِّد جهد البوابة الذي ينقل الترانزستور إلى حالات on وoff. كي يعمل ترانزستور PUT في حالة نقل (conduction) يجب أن يكون جهد المصعد أكبر من جهد البوابة على الأقل بحوالي (0.7V)، وفي لحظة ما يكون فيها المكثف مفرّغاً تكون البوابة في حالة استقطاب عكسي وترانزستور PUT في حالة (off)، وخلال الزمن يبدأ المكثف (C1) بالشحن عبر المقاومة (R4) وعند تجمع قدر كاف من الشحنات في المكثف يتكون جهد كاف لتشكيل انحياز أمامي على البوابة فينتقل الترانزستور إلى حالة (on) وذلك إذا زاد تيار المصعدة (IA) عن التيار الأعظمي (IP). أثناء انتقال الـــ PUT إلى حالة (on) يفرّغ المكثف عبر الـــ PUT والمقاومة (R3). عندما يكون الـــ PUT في حالة (on) يكون الجهد بين المصعد والمهبط حوالي واحد فولت. عندما يصل المكثف إلى التفريغ الكامل ينخفض تيار المصعد ويتوقف نهائياً عن المرور عندما يصبح جُهد البوابة أقل من الجهد اللازمة لتشكيل انحياز أمامي، وبعد ذلك تتكرر دورة الشحن من جديد. يمكن أن تؤخذ جهود خرج الدارة من البوابة أو من المهبط والجهد المأخوذ من البوابة هو جهد سن منشاري أما الجهد المأخوذ من المهبط فهو على شكل نبضات ضيقة (إبريّة تقريباً).

يبدأ الـ PUT بالنقل عندما يكون $(V_A = V_G + 0.7V)$ والجهد V_A هو الجهد المطبق على المصعد عن طريق مقسم الجهد.

$$V_A = \frac{R_2 V_+}{R_1 + R_2}$$

وعندما يصبح V_A أكبر من V_G بحوالي (0.7V) يمر تيار مصعد عبر الترانزستور (I_A) ويحسب هذا التيار من العلاقة:

$$I_A = \frac{V_+ - V_A}{R_1 + R_2}$$

4.4 الثايرستورات

1.4.4 مقدمة

تحوي عائلة الثايرستورات على مجموعة من العناصر الإلكترونية والتي لها أرجل تتراوح بين (2) و(4)، وتستخدم هذه العناصر على الأغلب كمفاتيح إلكترونية. ولا تستخدم نهائياً في التضخيم. في الثايرستور الذي له ثلاث أرجل يُستخدم تيار منخفض عبر إحدى الأرجل والتي تسمى رجل التحكم أو جهد منخفض يُطبق على رجل التحكم من أجل التحكم بتيار عالٍ يمر بين القطبين الآخرين للثايرستور. في الثايرستورات التي لها طرفان فقط لا يوجد طرف للتحكم ويصمم العُنصر بحَيث ينتقل إلى حالة (on) إذا زاد الجهد المطبق بين طرفيه عن مستوىً محدد يسمى جهد الانهيار، أما إذا كان الجهد بين طرفي العنصر أقل من جهد الانهيار فإن العنصر يبقى في حالة (off).

ربما تتساءل متعجباً هنا، لماذا لا نستخدم الترانزستور بدلاً من الثايرستور في تطبيقات الفتح والإغلاق؟ حسناً في بعض التطبيقات يمكن استخدام الترانزستورات كمفاتيح، ولكن بمقارنة الترانزستور بالترياك تلاحظ أن الترانزستورات تحتاج إلى تيارات أو جهود تحكم مضبوطة بدقة كي تعمل كمفاتيح وإذا كان جهد التحكم أو تياره لا يساوي القيمة الدقيقة المناسبة فإن الترانزستور يعمل في منطقة بين القطع (off) والوصل (on) وهذه الحالة غير مناسبة عند تشغيل الترانزستور كمفتاح، أما الثايرستورات فلا تصمم أصلاً بحيث تنشأ فيها مثل هذه الحالة فهي أثناء التشغيل إما (on) أو (off).

أما من ناحية التطبيقات فإن الثايرستورات تستخدم في تطبيقات عديدة منها:

- دارات التحكم بالسرعة (speed control circuits).
- دارات وصل وفصل القدرة (power switching circuits).
- دارات بدائل الحواكم.
- دارات المؤقتات منخفضة الكلفة.
- دارات الهزازات.
- دارات كواشف المستوى.
- دارات قالبات الجهد المستمر إلى متناوب (inverter circuits).
- دارات المقطعات (chopper circuits).
- الدارات المنطقية (logic circuits).
- دارات التحكم بالإضاءة (light dimming circuits).
- دارات التحكم بسرعة دوران المحركات (motor speed control).

وفي تطبيقات أخرى عديدة.

الجدول (3.4): الأنواع الرئيسيّة للثايرستورات.

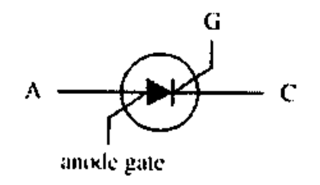
النوع Type	الرمز	نمط العمل
مقوِّم سيلكوني متحكم به SCR (silicon-controlled rectifier)	G A C	في الوضع الطبيعي يكون هذا العنصر في حالة (off)، وعندما يمر تيار صغير عبر البوابة (G) ينتقل العنصر إلى حالة (on) وحتى لو تم فصل تيار البوابة فإن الثايرستور يبقى في حالة (on)، ولإعادة الثايرستور إلى حالة (off) يجب توقيف التيار بين المصعد والمهبط عن المرور ويمكن تحقيق ذلك بجعل جهد المصعد أقل إيجابية من جهد المهبط. يمر التيار عبر الثايرستور باتجاه واحد فقط من المصعد (A) إلى المهبط (C).
مفتاح سيلكوني متحكم به SCS (silicon-controlled switch)	G A C anode gate	هذا العنصر يشبه الثايرستور ولكن يمكن نقله إلى حالة (off) بتطبيق نبضة جهد موجب على رجل رابعة تسمى بوابة المصعد (anode gate) ويمكن جعل هذا العنصر ينتقل إلى حالة (on) عند تطبيق جهد سالب على بوابة المصعد. يمر التيار عبر العنصر باتجاه واحد من المصعد (A) إلى المهبط (C).
الترياك Triac	G MT1 MT2	هذا العنصر مشابه للثايرستور ولكنه يمرر التيار في الاتجاهين وهذا يعني أنه يمكن استخدامه كمفتاح للتيارات المستمرة (dc) والمتناوبة (ac). يبقى الترياك في حالة (on) فقط إذا مر تيار عبر البوابة وينتقل إلى حالة (off) فور فصل تيار البوابة. يمر التيار في الاتجاهين عبر MT1 وMT2.
الديود رباعي الطبقات four layer diode	A C	لهذا العنصر طرفان فقط وعند وضع هذا العنصر بين نقطتين في دارة فإنه يعمل كمفتاح حساس للجهد وطالما بقي الجهد بين طرفيه أقل من جهد محدَّد وخاص به (ويسمى جهد الانهيار) فإنه يبقى في حالة (off)، أما عند تجاوز الجهد بين طرفيه لجهد الانهيار فإنه ينتقل إلى حالة (on) ويمرر التيار باتجاه واحد من المصعد إلى المهبط.
الدياك Diac		عنصر مشابه للديود رباعي الطبقات ولكنه يمرر في الاتجاهين. مصمم بحيث يمرر تيار مستمر (dc) أو متناوب (ac).

يقدم الجدول (3.4) ملخصاً للأنواع الأساسية للثايرستورات (عناصر عائلة الثايرستور). عندما تمر معك عبارة (turns it on) فإنها تعني أن مساراً ناقلاً للتيار يتم تأمينه بين الأطراف الناقلة للعنصر، على سبيل المثال بين مصعد الثايرستور ومهبطه أو بين MT1 وMT2 في الترياك، أما عبارة (Normally off) والتي تعني أن العنصر في حالة off (قطع) فإن ما يجب أن تفهمه منها هو أنه لا يوجد جهد مطبق على البوابة (البوابة دارة مفتوحة). سوف نقدم معلومات أكثر عن هذه العناصر في الفقرات التالية.

2.4.4 المقومات السيلكونية المتحكم بها

يسمى المقوِّم السيلكوني المتحكم به اختصاراً باسم ثايرستور ويرمز له بـــ (SCR) والثايرستورات (SCRs) هي عناصر إلكترونية لها ثلاث أرجل (أطراف) وتستخدم بشكلٍ أساسي كمفاتيح متحكم بها كهربائياً.

عند تطبيق جهد قدح موجب محدَّد على بوابة الثايرستور (أو عند مرور تيار محدّد عبرها) تتشكل قناة ناقلة للتيار بين المصعد (A) والمهبط (C)، ويمر تيار باتجاه واحد عبر الـــ SCR من المصعد (A) إلى المهبط (C)، تماماً كما هي الحال في الديود.

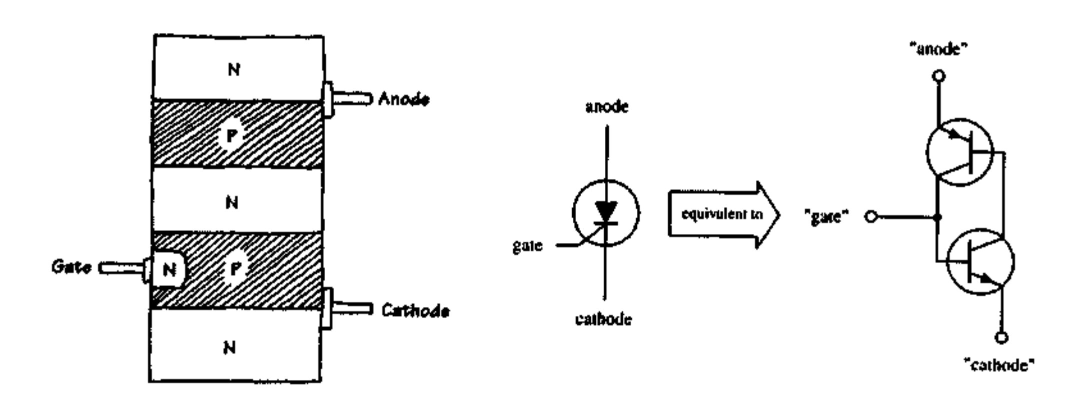


الشكل (89.4): رمز الثايرستور.

هناك ميزة فريدة للثايرستور، إضافة إلى عمله كمفتاح متحكم به، وهذه الميزة تتعلق بحالة النقل في الثايرستور بعد قطع تيار البوابة. بعد قدح الثايرستور إلى حالة نقل، فإن الثايرستور يبقى في حالة نقل حتى لو تم قطع تيار البوابة، أو فصل جهد التحكم عن طرف البوابة. الطريقة الوحيدة لنقل الثايرستور إلى حالة قطع هي قطع التيار المار بين المصعد والمهبط أو بعكس قطبية الجهود على المصعد والمهبط. يستخدم الثايرستور في تطبيقات عديدة منها دارات الفتح والإغلاق، دارات التحكم الصفحي، دارات قالبات الجهد المستمر إلى متناوب وفي دارات القص وفي دارات قيادة الحواكم وغيرها.

كيف تعمل الثايرستورات

يمكن اعتبار الثايرستور كترانزستورين (npn) و(pnp) موصولين مع بعض كما في الشكل (90.4) وتستخدم دارة الترانزستورات المكافئة للثايرستور فقط من أجل شرح مبدأ عمل الثايرستور.



الشكل (90.4): بنية الثايرستور والدارة الترانزستورية المكافئة له.

الثايرستور في حالة off

تلاحظ من الدارة المكافئة الترانزستورية أنه إذا لم يطبق جهد قدح موجب مناسب على البوابة (G) والموصولة مع قاعدة الترانزستور (npn) فإن الترانزستور (npn) يبقى في حالة قطع ولا يمر تيار عبر مجمعه وبالتالي لا يمر تيار عبر قاعدة الترانزستور (pnp)، لأن تيار مجمع ترانزستور الــ (npn) هو تيار قاعدة ترانزستور الــ (pnp) ويكون الترانزستور (pnp) أيضاً في حالة قطع ولا يمر تيار من المصعد إلى المهبط.

الثايرستور في حالة on

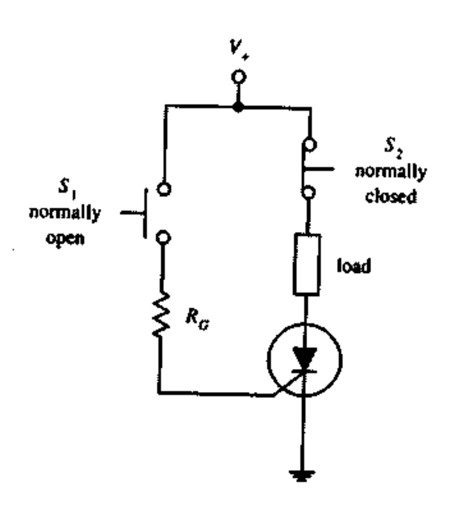
إذا طبق جهد موجب على البوابة، أي إذا كانت قاعدة ترانزستور الــ (npn) مستقطبة بالشكل المناسب، فإن هذا الترانزستور ينتقل إلى حالة (on) وعندها يمر تيار عبر قاعدة ترانزستور الــ (pnp) وعبر مجمعه فينتقل هذا الترانزستور إلى حالة

(on) ويمر التيار بحرية من المصعد إلى المهبط. لاحظ أن الثايرستور يبقى في حالة (on) حتى لو تم قطع تيار البوابة الخارجي وفي الدارة الترانزستورية المكافئة يتضح ذلك بسهولة حيث أن تيار قاعدة ترانزستور الـ (npn) اللازم لاستمرارية هذا الترانزستور في حالة عمل يتم تأمينه من مجمع ترانزستور الـ (pnp) وذلك لأن الترانزستورين كانا في حالة عمل قبل فصل تيار البوابة الخارجي ويستمر التيار بالمرور عبر الدارة ولا يوجد أي سبب لانتقال الترانزستورات إلى حالة قطع.

التطبيقات الاساسية للثايرستور

مفتاح ماسك اساسي

في هذه الدارة (الشكل 91.4) يُستخدم الثايرستور لبناء دارة مفتاح ماسك بسيطة. المفتاح S1 هو تماس لحظي ويكون في الوضع الطبيعي في حالة (off) أما S2 فهو عبارة عن مفتاح لحظي وفي الوضع الطبيعي يكون في حالة (on). عند ضغط (S1) وتحريره تمر نبضة تيار عبر قاعدة الثايرستور وتنقله إلى حالة (on) ويمر تيار عبر الحمل ويستمر مرور التيار عبر الحمل حتى لحظة ضغط المفتاح (S2) وعندها ينتقل التيار إلى حالة (off). تستخدم المقاومة (RG) لتحديد تيار البوابة، وسوف نتعرف في فقرة لاحقة وبشكل أدق على مواصفات القدح المطلوب للثايرستورات.

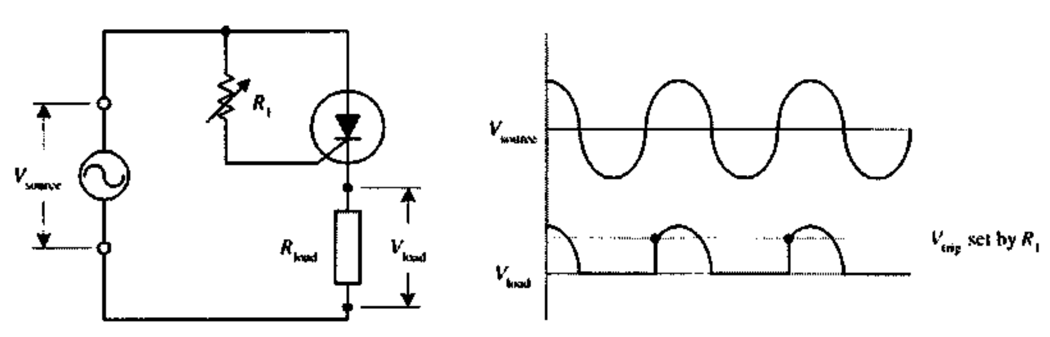


الشكل (91.4): دارة مفتاح ثايرستوري ماسك بسيط.

مقوّم قابل للضبط

يستخدم في هذه الدارة ثايرستور لتقويم إشارة متناوبة جيبيّة من أجل تغذية حمل. عند تطبيق جهد جيبي على البوابة، ينتقل الثايرستور إلى حالة (on) عندما يُطبق الجهد الموجب للموجة الجيبيّة خلال نصف الدور الأول على كلٍ من المصعد والبوابة وفقط عندما يتجاوز جهد البوابة قيمة جهد القدح وحالما ينتقل الثايرستور إلى حالة (on) يمر التيار من المصعد إلى المهبط ويمر التيار عبر الحمل. أما خلال نصف الدور السالب للموجة الجيبيّة فإن الثايرستور يكون كديود مستقطب عكسياً ولا يمرر التيار، أي يكون في حالة قطع (off).

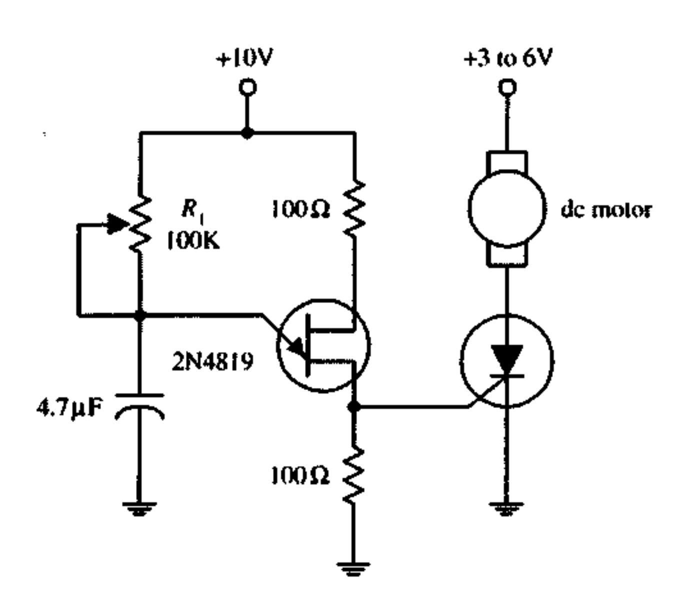
بزيادة المقاومة R1 ينخفض الجهد المطبق على البوابة (G) وبالتالي ينخفض تيار البوابة ويؤدي ذلك إلى تأخير لحظة انتقال الثايرستور إلى حالة (on) وبالتالي يمكن بواسطة (R1) التحكم بفترة تمرير الثايرستور خلال نصف الدور الأول (الموجب)، انظر الشكل (92.4) وبالتحكم بفترة التمرير خلال نصف الدور الموجب يتم التحكم بالقيمة الوسطى للجهد المطبق على الحمل. إن ميزة استخدام ثايرستور (SCR) للتحكم بالتيار بالمقارنة مع استخدام مقاومة تسلسلية متغيرة هو عدم ضياع قدرة على الثايرستور، أما عند استخدام مقاومة متغيرة فإن التيار المار عبر مقاومة التحكم يؤدي إلى ضياع استطاعة على المقاومة.



الشكل (92.4): دارة مقوّم قابل للضبط.

متحكم بسرعة محرك تيار مستمر

يمكن وكما هو واضح في الشكل (93.4) استخدام ثايرستور (SCR) وترانزستور (UJT) مع مكثف ومجموعة مقاومات لتشكيل دارة تحكم بسرعة دوران محرك تيار مستمر. الدارة المكونة من الـــ UJT والمكثف والمقاومات هي عبارة عن دارة مولد نبضات وهذه النبضات تُطبق على بوابة الثايرستور. عندما يتجاوز الجهد المطبق على البوابة عتبة القدح ينتقل الثايرستور إلى حالة (on) فيمر تيار عبر المحرك. يمكن تغيير تردد اهتزاز مولد النبضات بتغيير المقاومة (R1) ويتغير مع تغير التردد عدد المرات التي تُقدح بها بوابة الثايرستور وتتغير سرعة دوران المحرك. أثناء العمل يبدو لك أن المحرك يدور باستمرار على الرغم من أن جهد التغذية يُطبق على المحرك بشكل نبضي (on) و(off). تتحدد سرعة المحرك بمتوسط عدد الحالات التي يكون فيها المحرك (on) خلال فترة زمنيّة. قد يخطر ببالك استخدام مقاومَة متغيرة على التسلسل مع المحرك للتحكم بسرعة دورانه، ولكن تذكر دوماً ضياعات الاستطاعة على هذه المقاومة.

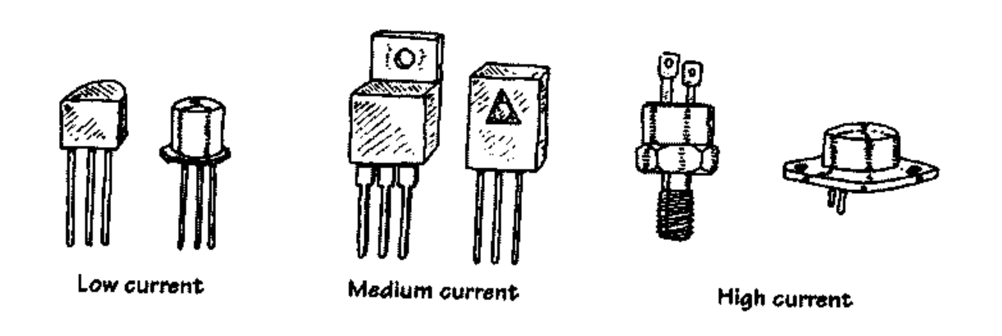


الشكل (93.4): متحكم بسرعة دوران محرك تيار مستمر.

انواع الثايرستورات

تصمم بعض الثايرستورات خصيصاً من أجل تطبيقات التحكم الصفحي، أما بعضها الآخر فيصمم من أجل تطبيقات الفتح والإغلاق (التقطيع) عالي السرعة. ربما تكون أهم ميزة في الثايرستور هي التيار الذي يتحمله الثايرستور.

تتوفر ثايرستورات منخفضة التيار بمعدلات تيار/جهد لا تتجاوز 100/1A فولت. أما الثايرستورات المتوسطة التيار فتتوفر بمعدلات تيار/جهد بحدود 10A/100V. تبلغ المعدلات الأعظمية للتيار والجهد في الثايرستورات عالية التيارات عدة آلاف الأمبير وعدة آلاف الفولت. يُصنع غلاف الثايرستورات منخفضة التيارات من البلاستيك أو المعدن، أما الثايرستورات متوسطة وعالية التيارات فإنها تكون مزودة بمبدد حرارة ذاتي (مصنوع مع الثايرستور)، وقد لا يكفي هذا المبدِّد بمفرده أثناء الاستخدام، وعندها لا بد من استخدام مبدِّد حرارة خارجي إضافي.



الشكل (94.4): أشكال الثايرستورات.

البارمترات الأساسية للثايرستور

نبيِّن فيما يلي بعض البارامترات التي يستخدمها المنتجون لوصف ثايرستوراتهم:

V_T: (in state voltage) الجهد على الثايرستور في حالة (on) وهو هبوط الجهد بين مصعد الثايرستور ومهبطه عندما يكون في حالة نقل (on).

I_{GT}: تيار قدح البوابة (gate trigger current) وهو تيار القدح الأصغري اللازم لنقل الثايرستور إلى حالة (on).

V_{GT}: جهد قدح البوابة (gate trigger voltage) وهو جهد القدح الأصغري اللازم لتأمين التيار الأصغري الضروري لقدح الثايرستور.

IH: تيار المسك (Holding Current) وهو التيار الأصغري الذي يجب أن يمر بين المصعد والمهبط كي يبقى الثايرستور في حالة on.

P_{GM}: تبديد الاستطاعة الأعظمي على البوابة (peak gate power dissipation)، الاستطاعة الأعظمية التي يمكن أن تبدد بين البوابة والمهبط في الثايرستور.

V_{DRM}: جهد حالة القطع الأعظمي التكراري (Repetitive peak off-state voltage)، القيمة اللحظية الأعظمية للجهد على الثايرستور عندما يكون في حالة قطع متضمناً كافة الجهود العابرة التكرارية وغير متضمن للجهود العابرة غير التكرارية.

I_{DRM}: تيار حالة القطع الأعظمي التكراري (Repetitive peak off-state current)، القيمة اللحظية العظمى لتيار حالة القطع والذي ينتج عن تطبيق جهد قطع أعظمي تكراري على الثايرستور.

V_{RRM}: جهد عكسي أعظمي تكراري (Repetitive peak reverse voltage)، القيمة اللحظية العظمى للجهد العكسي الذي ينشأ على الثايرستور متضمنة كافة الجهود العابرة التكرارية، دون أن تتضمن الجهود العابرة غير التكرارية.

I_{RRM}: التيار العكسي الأعظمي التكراري (Repetitive peak reverse current)، القيمة اللحظية العظمى للتيار العكسي الناتج عن تطبيق جهد عكسي أعظمي تكراري على الثايرستور.

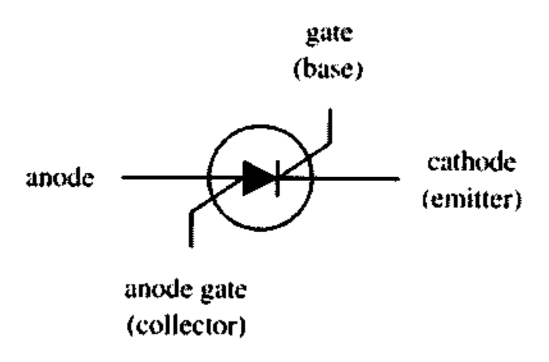
في الجدول 4.4 تعطى قيم هذه البارامترات لثايرستور محدَّد.

الجدول (4.4): عينة من جدول مواصفات الثايرستورات.

MNFR#	V_{DRM} (MIN) (V)	I_{DRM} (MAX) (mA)	I_{RRM} (MAX) (mA)	V_T (V)	I_{GT} (TYP/MAX) (mA)	V_{GT} (TYP/MAX) (V)	I_H (TYP/MAX) (mA)	P_{GM} (W)
2N6401	100	2.0	2.0	1.7	5.0/30	0.7/1.5	6.0/40	5

3.4.4 المفاتيح السيلكونية المتحكم بها SCS

المفتاح السيلكوني المتحكم به هو عنصر مشابه للمقوم السيلكوني SCR ولكنه مصمم بحيث ينتقل إلى حالة (off) عند تطبيق نبضة جهد أو تيار موجبة على طرف إضافي فيه يسمى بوابة المصعد (anode gate). يمكن أن ينتقل العنصر إلى حالة التمرير بتطبيق نبضة جهد سالب على نفس الطرف المسمى بوابة المصعد وفيما عدا ذلك فإن عمل وسلوك المفتاح السيلكوني في التطبيقات يشبه تماماً عمل المقوِّم السيلكوني SCR (انظر الفقرة الأخيرة لمزيد من التفاصيل). يبيِّن الشكل (95.4) رمز الـــ SCS ومن الجدير بالذكر هنا أن تسميات أرجل هذا العنصر قد لا تظهر كمصعد (anode) ومهبط (cathode) و(gate) بوابة و(anode gate) بوابة مصعد وإنما قد تسمى بأسماء: باعث (emitter) بدلاً من المهبط ومجمع (collector) بدلاً من بوابة المصعد وقاعدة (base) بدلاً من البوابة.

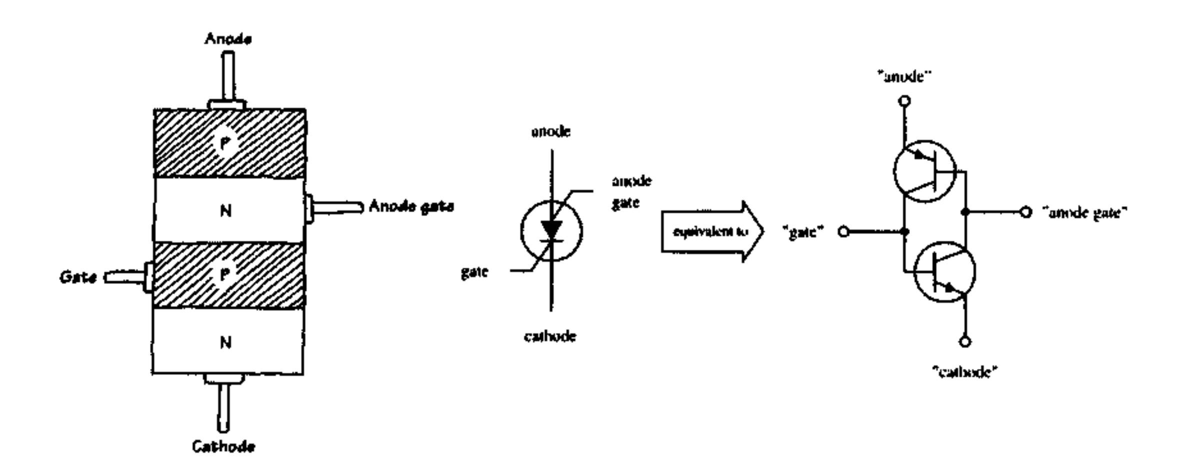


الشكل (95.4): رمز المفتاح السيلكوني SCS.

تستخدم المفاتيح السيلكونية (SCSs) في العدادات، ودارات قيادة المصابيح lamp drivers، وفي دارات وصل وفصل القدرة، وفي الدارات المنطقية، وكذلك في أية دارة تحتاج مفتاحاً يُنقل إلى حالات (on) و(off) بنبضات مختلفة.

كيف يعمل المفتاح السيلكوني

يبيِّن الشكل (96.4) بنية مفتاح سيلكوني SCS ودارته الترانزستورية المكافئة، وكما تلاحظ فإن الدارة الترانزستورية المكافئة تبدو مشابهة كثيراً للدارة الترانزستورية المكافئة للثايرستور وقد أُضيف إليها طرف لبوابة المصعد. عند تطبيق نبضة قدح موجبة على البوابة ينتقل الترانزستور (npn) إلى حالة (on) وينقل بذلك الترانزستور (pnp) إلى حالة (on) وعندها يمكن أن يمر التيار من المصعد إلى المهبط ونقول إن المفتاح SCS قد انتقل إلى حالة (on). ويبقى المفتاح SCS في حالة (on) حتى لو تم فصل جهد القدح عن البوابة. بعكس قطبيات المصعد والمهبط أو بتطبيق جهد سالب على بوابة المصعد يُمكن أن يُنقل المفتاح SCS إلى حالة قطع لأن تطبيق جهد سالب على بوابة المصعد قد يؤدي إلى انخفاض تيار استقطاب الدعم الذاتي (self sustaining biasing current).



الشكل (96.4): بنية مفتاح SCS والدارة الترانزستورية المكافئة له.

مواصفات المفتاح SCS

عند شراء SCS تأكد من اختيار عنصر له جهد انهيار، وتيار، ومعدَّل تبديد قدرة مناسبة. في جدول مواصفات المفتاح السيلكوني نجد الأمور التالية: BV_{CB}، BV_{EB}، BV_{CE}، I_E، I_C، I_H (تيار المسك) وP_D (استطاعة التبديد)، وفي هذه الرموز تم اعتماد التسميات البديلة لأقطاب المفتاح فالحرف (C) يدل على بوابة المصعد والحرف (E) على المهبط والحرف (B) على البوابة.

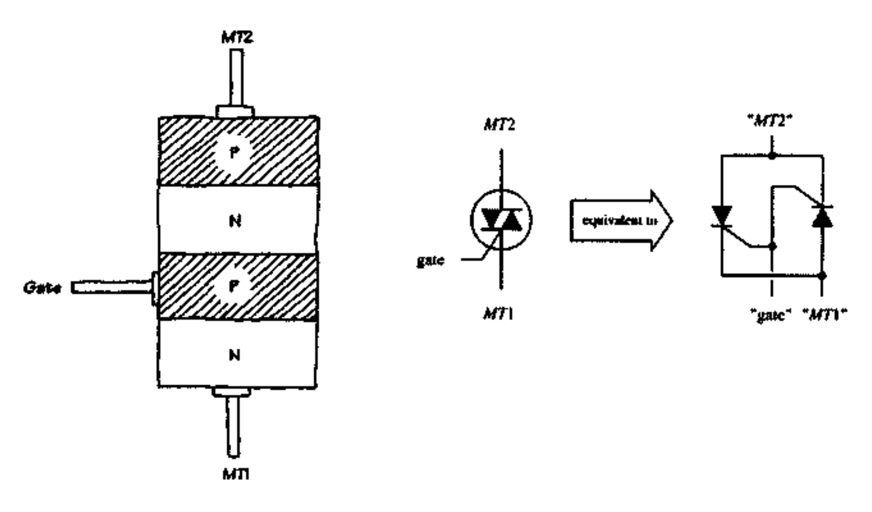
4.4.4 الترياكات

الترياكات هي عناصر مشابهة للمقومات السيلكونية (الثايرستورات SCRs) وتعمل كمفاتيح متحكم بها كهربائياً، ولكنها بعكس الثايرستورات مصممة لتمرير التيار في الاتجاهين وهذا يجعلها مناسبة للاستخدام في دارات التيار المتناوب.

للترياك ثلاث أرجل (أطراف)، طرف بوابة وطرفان ناقلان MT1 وMT2. يكون الترياك في حالة قطع (off) عند عدم تطبيق جهد أو تيار على البوابة، ولكن وعند تطبيق جهد (تيار) على البوابة وتجاوزه لحد معين ينتقل الترياك إلى حالة (on) ولقطع الترياك يكفي فصل جهد البوابة. تستخدم الترياكات في دارات التحكم بمحركات التيار المتناوب، وفي دارات التحكم الصفحي وفي دارات وصل وفصل القدرة المتناوبة (ac) وغالباً ما تستخدم الترياكات كبدائل للحواكم الميكانيكية.

كيف تعمل الترياكات

يبيِّن الشكل (98.4) بنية الترياك والدارة الثايرستورية المكافئة له، والترياك يشبه ثايرستورين موصولين على التوازي والتعاكس (reverse-parallel) وتوضح الدارة الثايرستورية المكافئة كيفية عمل الترياك حيث ينقل الترياك اليساري في الدارة المكافئة التيار من MT1 إلى MT2 عند تطبيقِ نبضة قدح موجب على بوابته وطبعاً إذا كانت MT1 أكثر إيجابية من MT2 (في نصف الدور الموجب لموجة جيبيّة مثلاً) ولكنه ينتقل إلى القطع إذا أصبح جهد MT1 أصغر من جهد MT2 ولكن في هذه الحالة ينقل الثايرستور اليميني التيار من MT2 إلى MT1 وطبعاً إذا طبق على بوابته جهد قدح موجب. لاحظ أن البوابات موصولة مع بعضها بحيث تظهر طرفية بوابة واحدة للعنصر إلى العالم الخارجي.



الشكل (98.4): بنية الترياك ورمزه ودارته الثايرستورية المكافئة.

الترياك في حالة off

في حال عدم تطبيقٍ قدح على البوابة يكون الثايرستوران في حالة قطع ولا يمرر أي من الثايرستورين التيار في أي اتجاه ويبقى الترياك قاطعاً.

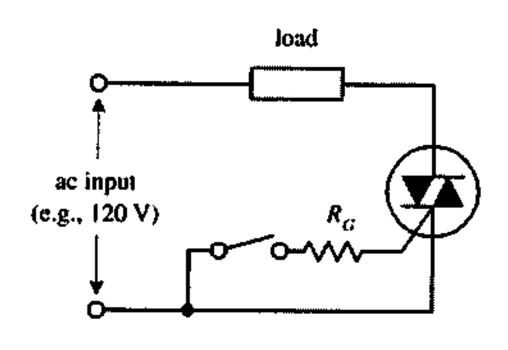
الترياك في حالة on

عند تطبيق جهد/تيار قدح موجب ينتقل كل ثايرستور إلى حالة (on) إذا كان جهد مصعده أكبر من جهد المهبط وينقل التيار من MT1 إلى MT2 أو بالعكس. عند فصل جهد القدح ينتقل الثايرستوران إلى حالة قطع عندما يَعْبر الجهد المتناوب المطبق على طرفي الترياك بالصفر.

تطبيقات أساسية

مفتاح بسيط

تُعطى هنا دارة بسيطة تبيِّن كيفية استخدام الترياك لتمرير أو قطع تيار عن حمل في دارة. عندما يكون المفتاح الميكانيكي مفصولاً لا يُطبق على بوابة الترياك أي جهد ولا يمر بها تيار ولا يحصل قدح للترياك فيبقى مقطوعاً ولا يمر التيار عبر الحمل. عند وصل المفتاح الميكانيكي يمر تيار صغير عبر R_G ويُقدح الترياك إلى حالة النقل (conduction)، وذلك بفرض أن جهد القدح وتياره يحققان متطلبات القدح اللازمة للترياك، فيمر تيار عبر الحمل. عند فتح المفتاح الميكانيكي ثانية ينتقل الترياك إلى حالة قطع ويُمنع التيار من المرور عبر الحمل.

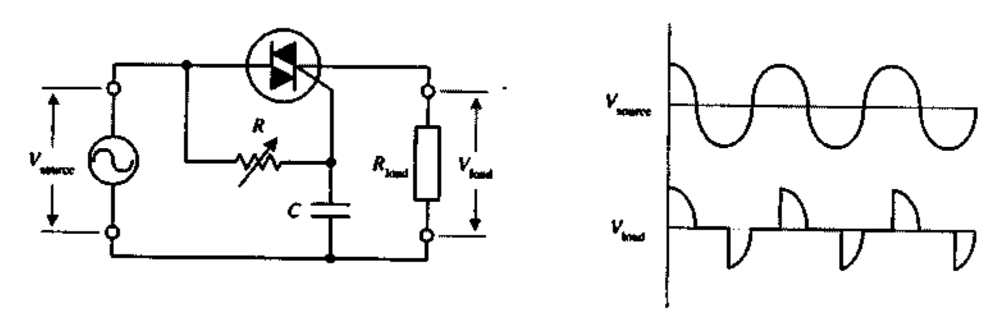


الشكل (99.4): دارة مفتاح بسيط.

دارة تحكم بالاستطاعة

يُستخدم في هذا الشكل ترياك ومقاومة متغيرة مع مكثف لتكوين دارة يتم فيها تمرير تيار إلى الحمل خلال فترات من أنصاف الدور الموجب والسالب (أي لا يمر التيار عبر الحمل خلال كامل نصف الدور الموجب وكذلك الأمر بالنسبة لنصف الدور السالب). المقاومة المتغيرة R هي التي تتحكم بلحظة انتقال الترياك إلى حالة on لأن المكثف يشحن عبر هذه المقاومة وعندما يصبح جهد المكشف مساوياً لجهد القدح يُطلق الترياك إلى حالة (on) ويمرر تياراً عبر الحمل وفي الشكل (100.4) يُعطى شكل جهد الحمل ومنه تلاحظ أنه يتم قص أجزاء من جهد الدخل في نصفي الدور الموجب والسالب وكلما زادت قيمة المقاومة R يتأخر إطلاق الترياك ويزداد الجزء المقصوص وبالطبع يؤثر المكثف أيضاً على لحظة الإطلاق لأن الجهد على المكثف يتأخر بالصفحة عن جهد الدخل المطبق بين MT2 وMT1، فمثلاً إذا كان جهد المكثف كافياً للقدح ولكن الجهد بين طرفي MT1 وMT2 يمر بالصفر عندها لن يحدث قدح وسوف يتأخر القدح حتى يتجاوز الجهد قيمة الصفر.

كلما زاد القص في موجة الدخل تنخفض القدرة المقدمة إلى الحمل وطبعاً إذا ما قورنت هذه الدارة التي تتحكم بالقدرة المقدمة إلى الحمل مع دارة تحوي حملاً على التسلسل مع مقاومة متغيرة بسيطة تلاحظ أن دارتك هنا لا تضيع أي استطاعة.

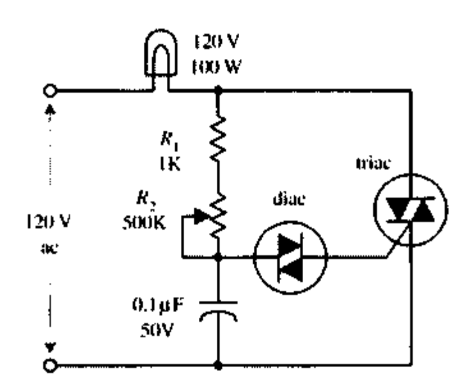


الشكل (100.4): دارة متحكم بالاستطاعة وأشكال جهود الدخل والحمل.

دارة متحكم بالإضاءة AC

تستخدم هذه الدارة (الشكل 101.4) في العديد من مفاتيح وصل الإنارة في المنازل فالدياك (diac) -الذي سنتعرف عليه في الفقرة التالية- يُستخدم لضمان القدح الدقيق للترياك. يعمل الدياك على توصيل تيار بين طرفيه عند تجاوز الجهد المطبق عليه لجهد انهياره. وحالما يصل الجهد على طرفي الدياك إلى قيمة جهد الانهيار فإنه يمرر نبضة تيار إلى الترياك. في لحظة ما يكون الدياك في حالة قطع وعندما يصل جهد المكثف الذي يُشحن عبر المقاومات (R1) و(R2) إلى قيمة تساوي جهد

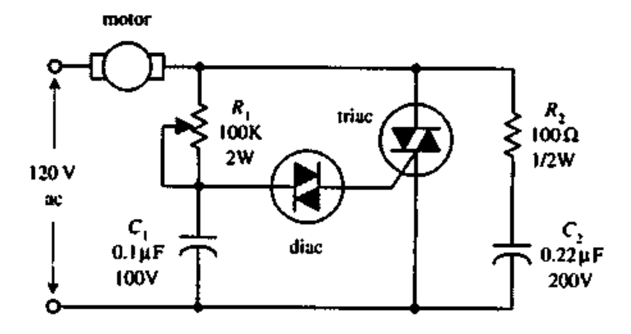
انهيار الدياك فإن الدياك يمرر تياراً إلى بوابة الترياك فيقدح الترياك إلى حالة نقل ويمر تيار عبر المصباح وعندما يفرّغ المكثف إلى جهد أقل من جهد قدح الدياك فإن الدياك يعود إلى حالة (off) ويُقطع الترياك ويعود المصباح إلى حالة (off) وتتكرر الدورة ويظهر لك أن المصباح في حالة (on) لكن إضاءته تنخفض وذلك لأن حالات (on) و(off) في المصباح تحدث بشكل سريع جداً، ويتم التحكم بإضاءة المصباح بواسطة المقاومة R2.



الشكل (101.4): دارة تحكم بإضاءة مصباح ac.

متحكم بمحرك تيار متناوب

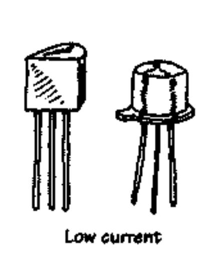
هذه الدارة تشبه من حيث الشكل دارة التحكم بإضاءة المصباح ولكن أضيف إليها فرع مكون من R2 وC2 لكبت الحالة العابرة. يتم التحكم بسرعة دوران محرك التيار المتناوب بواسطة المقاومة المتغيرة (R1).

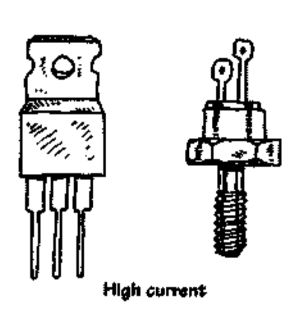


الشكل (102.4): دارة تحكم بمحرك تيار متناوب.

أنواع الترياكات

تتوفر الترياكات لتيارات منخفضة ومتوسطة والترياكات منخفضة التيار تكون عادة ذات قدرة على تمرير تيار لا يتجاوز (1A) وتتحمل جهداً يبلغ عدة مئات الفولت. أما الترياكات متوسطة التيارات فتتحمل تيارات حتى 40A وجهوداً حتى عدة آلاف الفولت. ومن الجدير بالذكر هنا أن الترياكات لا تستطيع التحكم بفتح وإغلاق دارات ذات تيارات عالية وعالية جداً كما هي الحال في الثايرستورات.





الشكل (103.4): أشكال بعض الترياكات.

المعطيات الفنية

نتعرف فيما يلي على بعض المعطيات الفنية التي يستخدمها المنتجون لوصف ترياكاتهم.

$I_{TRMS,max}$: القيمة الفعالة (RMS) لتيار حالة on، وهي القيمة العظمى المسموحة للتيار الذي يمر بين MT1 وMT2.

$I_{GT,min}$: تيار مستمر (dC) لقدح البوابة، تيار البوابة المستمر الأصغري اللازم لنقل الترياك إلى حالة (on).

$V_{GT,min}$: جهد مستمر (dC) لقدح البوابة، الجهد المستمر الأصغري اللازم لقدح البوابة بحيث يمر عبرها التيار الأصغري اللازم لنقل الترياك إلى حالة (on).

I_H: تيار المسلك (dC) وهو التيار المستمر الأصغري الذي يجب أن يمر بين MT1 وMT2 كي يبقى الترياك في حالة (on).

P_{GM}: تبديد الاستطاعة الأعظمي على البوابة (peake gate power dissipation)، وهو الاستطاعة الأعظمية المبدَّدة بين البوابة وMT1.

Isurge: تيار اندفاعي (مفاجئ)، وهو التيار الاندفاعي (المفاجئ) الأعظمي المسموح.

يبيِّن الجدول (5.4) عينة من جدول مواصفات ترياك، والغاية من هذا الجدول هي إعطاء فكرة عن القيم المتوقعة لبارامترات الترياك.

الجدول (5.4): عيّنة من جدول مواصفات ترياك.

MNFR#	$I_{T,RMS}$ MAX (A)	I_{GT} MAX (mA)	V_{GT} MAX (V)	V_{FON} (V)	I_H (mA)	I_{SURGE} (A)
NTE5600	4.0	30	2.5	2.0	30	30

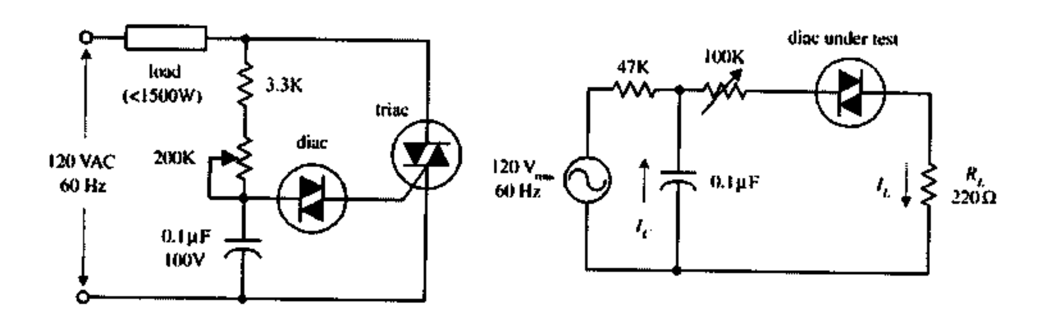
5.4.4 الديودات رباعية الطبقات والدياكات

الديودات رباعية الطبقات والدياكات هي عناصر لها طرفان (رجلان) ولا تحتاج إلى إشارة بوابة، وبدلاً من ذلك فإن هذه العناصر تنتقل إلى حالة (on) عندما يصل الجهد بين طرفيها إلى قيمة خاصة تسمى جهد الانهيار (breakdown voltage) أو (breakover voltage). والديود رباعي الطبقات يشبه الثايرستور SCR ولكن بدون بوابة وهو مصمم فقط للعمل مع الجهود والتيارات المتناوبة.



الشكل (104.4): رموز الديود رباعي الطبقات والدياك.

تستخدم الديودات رباعية الطبقات والدياكات من أجل قدح الثايرستورات والترياكات فمثلاً عند استخدامك لدياك من أجل قدح ترياك كما في الشكل (105.4)، فإنك تتجنب القدح غير الموثوق الذي قد ينتج عن عدم الاستقرار الذي تسببه تغيرات درجة الحرارة لعناصر دارة القدح. وعندما يتجاوز الجهد على طرفي الدياك بقليل قيمة جهد الانهيار، فإن الدياك يُعطي نبضة تيار إلى بوابة الترياك فيطلق الترياك إلى حالة (on).



الشكل (105.4): دارة قياس مواصفات الدياك ودارة تحكم صفحي كامل الموجة.

تستخدم الدارة اليمينية من الشكل (105.4) لقياس مواصفات الدياك وتضبط المقاومة المتغيرة (100kΩ) بحيث يُقدح الدياك مرة في كل نصف دور.

مواصفات الدياك

نبيِّن في الجدول (6.4) جزءاً نموذجياً من مواصفات الدياك.

الجدول (6.4): عيّنة من جدول مواصفات دياك.

MNFR#	V_{BO} (V)	I_{BO} MAX (µA)	I_{PULSE} (A)	V_{SWITCH} (V)	P_D (mW)
NTE6411	40	100	2	6	250

وفي هذا الجدول ترى الرموز التالية:

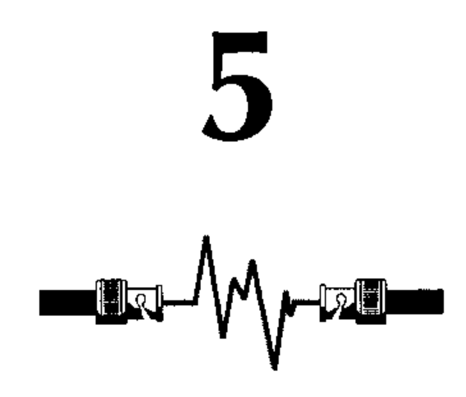
V_{BO}: ويعني جهد الانهيار (breakover voltage).

I_{BO}: ويعني تيار الانهيار (breakover current).

Ipulse: ويعني التيار الأعظمي النبضي (maximum peak pulse current).

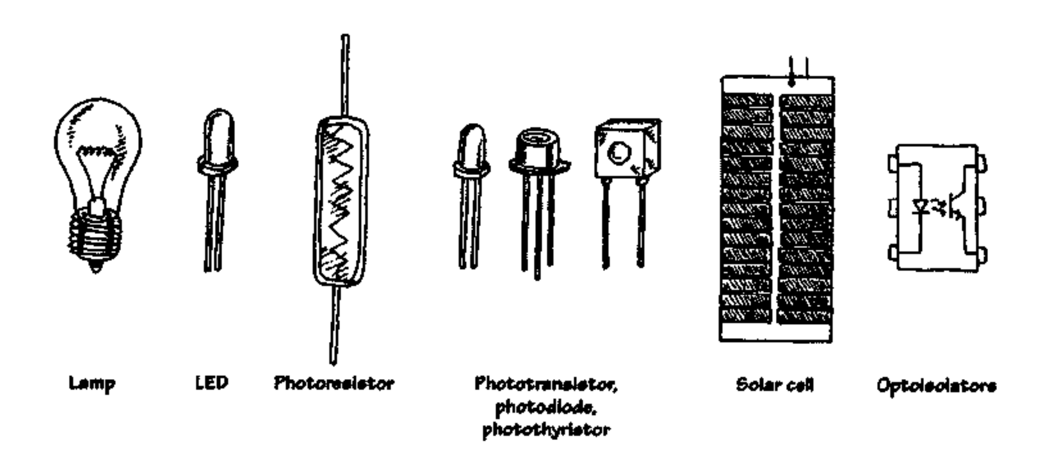
P_D: تبديد الاستطاعة الأعظمي.

5



الإلكترونيات الضوئية

الإلكترونيات الضوئية هي فرع من الإلكترونيات يهتم بالعناصر المصدرة للضوء وبالعناصر الكاشفة للضوء. العناصر المصدر للضوء (Light-emitting devices)، كالمصابيح (Lamps) والديودات المصدرة للضوء (LEDs) هي عناصر تخلق قدرة كهرومغناطيسية (كالضوء) باستخدام تيار كهربائي لإثارة الإلكترونات للانتقال إلى مستويات طاقة أعلى (وعندما يغير الإلكترون مستوى طاقته يتم إصدار فوتون). أما العناصر الكاشفة للضوء (Light detecting devices) كالترانزستورات الضوئية، والمقاومات الضوئية، فهي عناصر مصممة لالتقاط الطاقة الكهرومغناطيسية (الضوء) وتحويلها إلى تيارات وجهود كهربائية. ويتحقق ذلك باستخدام الفوتونات لتحرير الإلكترونات المرتبطة ضمن المواد نصف الناقلة. تستخدم العناصر المصدرة للضوء عادة لأغراض الإضاءة أو كأضواء بيان (indicator Lights). أما العناصر الكاشفة للضوء فتستخدم للتحسس بالضوء وفي أجهزة الاتصال، كالمفاتيح التي تُفعَّل مع حلول الظلام، وكذلك في أجهزة التحكم عن بعد. سندرس في هذا الفصل العناصر الكهروضوئية التالية: المصابيح (Lamps)، والديودات المصدرة للضوء (LEDs)، والمقاومات الضوئية (Photoresistors)، والديودات الضوئية (Photo diodes)، والخلايا الشمسية (Solar Cells)، والترانزستورات الضوئية (Phototransisiors)، والثايراستورات الضوئية (Photothyristors) والعوازل الضوئية (Optoisolators).



الشكل (1.5): بعض العناصر الكهروضوئية.

1.5: الفوتونات

الفوتونات هي الواحدات الأولية للإشعاع الكهرومغناطيسي، فالضوء الأبيض، على سبيل المثال، يتكون من عدد من الأنواع المختلفة من الفوتونات، بعضها فوتونات زرقاء، وبعضها فوتونات حمراء... الخ. من الضروري هنا الإشارة إلى أنه لا يوجد شيء اسمه فوتون أبيض ولكن عندما تتداخل تشكيلة من ألوان مختلفة من الفوتونات، فإن دماغنا يميزها بلون نسميه الضوء الأبيض (Whit Light). الفوتونات ليست محدودة بالضوء المرئي فقط، بل توجد أيضاً فوتونات راديوية التردد (Radiofrequency fotons)، وفوتونات بترددات ميكروية (microwave)، إضافة إلى أنواع أخرى من الفوتونات التي لا تستطيع عيوننا اكتشافها. تعتبر الفوتونات من الناحية الفيزيائية عديمة الوزن ولكنها تحمل طاقة وللفوتون طبيعة تشبه الطبيعة الموجية ضمن حزمته الكهرومغناطيسية. يتعلق طول موجة الفوتون بالوسط الذي ينتشر فيه الفوتون وبالمصدر الذي نتج عنه، (طول الموجه هو المسافة بين نقطتي قيمة عظمى متتاليتين للحقل الكهربائي أو المغناطيسي)، ويتحدد لون الفوتون بطول موجته ويتعلق تردد الفوتون بطول موجته وفقاً للعلاقة:

$$\lambda = v / f$$

v: هي سرعة الفوتون

f: تردد الفوتون

وفي الفضاء الحر تكون سرعة الفوتون مساوية سرعة الضوء ($C = 3\times10^{8}$ m/s). أما في الأوساط الأخرى كالزجاج مثلاً، فإن سرعة الفوتون تكون أقل من سرعة الضوء. الفوتون ذو طول الموجة الكبير (أو المنخفض التردد) يكون عادة أقل طاقة من الفوتون عالي التردد أو قصير الموجة، وتعطى طاقة الفوتون بالعلاقة $E = hf$.

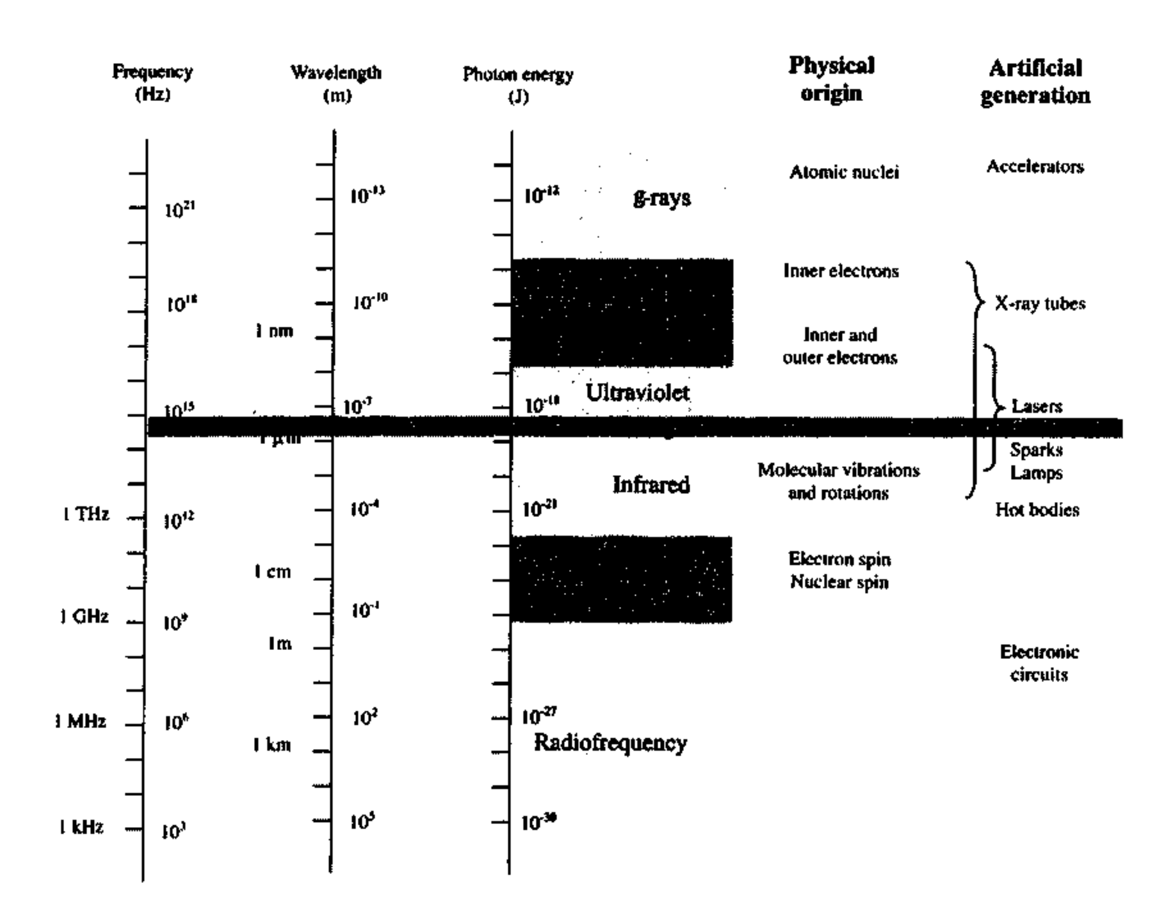
h: ثابت بلانك (Planck's Constant) ويساوي (6.63×10^{-34} J.S).

إن وسيلة تكوين (making) فوتون هي تسريع جسيم مشحون أو إبطاؤه. فمثلاً الإلكترونات التي تهتز إلى الأمام والخلف (back and forth) ضمن هوائي تنتج فوتونات بترددات راديوية وهذه الفوتونات ذات أطوال موجة كبيرة جداً عند مقارنتها بأطوال موجة الضوء. يتم إنتاج الضوء المرئي عند إجبار إلكترونات المدارات الخارجية في الذرات على الانتقال بين مستويات الطاقة (energy levels). ويمكن خلق فوتونات بترددات أخرى بتدوير (rotating) أو هز (Vibrating) جزيئات بسرعة عالية جداً. أما الأنواع الأخرى من الفوتونات ذات الطاقة العالية جداً (كأشعة غاما gamma rays) فيتم خلقها بتسريع الشحنات ضمن نواة الذرة.

يبين الشكل (5-2) الطيف الكهرومغناطيسي. يمتد مجال الترددات الراديوية من بضعة هرتزات (Hz) إلى حوالي (10^{9}Hz)، (أطوال الموجة من الكيلومترات إلى حوالي (0.3 m) ويتم توليد هذه الموجات بواسطة التيارات المتناوبة في خطوط نقل القدرة وبواسطة دارات كهربائية كما هي الحال في المرسلات التلفزيونية والراديوية.

يمتد المجال الترددي للفوتونات الميكروية (Microwave) من (10^{9} Hz) إلى 3×10^{11} Hz (أطول الموجة من 30 Cm إلى 1 mm)، ويمكن لهذه الفوتونات أن تخترق المجال الجوي للأرض ولذلك تستخدم للاتصال مع العربات الفضائية، وفي الاتصالات الراديوية الفضائية ولنقل المحادثات الهاتفية إلى الأقمار الصناعية، كما تستخدم أيضاً لطبخ الأطعمة. تولد الأمواج الميكروية بواسطة الانتقال الذري (atomic Transition) وبواسطة الدوران النووي nuclear spins والدوران الإلكتروني (electron spins).

أما الفوتونات تحت الحمراء (Infrared photons) فتتراوح تردداتها بين 3×10^{11}Hz و4×10^{14}Hz وتولد بواسطة الاهتزازات الجزيئية ويتم إصدارها عادة من السخانات الكهربائية (electric heaters) والفحوم المتوهجة (glowing coals) ومن جسم الشمس والأجسام البشرية التي تشع فوتونات بطول موجة يتراوح بين (3000) و(10000 nm) ويمكن توليدها أيضا بواسطة عناصر خاصة تُصنع من أنصاف النواقل.



الشكل (2.5): الطيف الكهرومغناطيسي.

تقع ترددات الفوتونات الضوئية في مجال ترددي ضيق يمتد من (3.84×10^{14} Hz) حتى (7.69×10^{14}Hz) ويتم إنتاجها عن طريق إعادة ترتيب الإلكترونات الخارجية في الذرات والجزيئات، فمثلاً تسرِّع الإلكترونات في فتائل المصباح الضوئي تسريعاً عشوائياً بتأثير الجهود المطبقة وتخضع لتصادمات متكررة، وتؤدي هذه التصادمات إلى تسريع للإلكترونات في مجال واسع وينتج عن ذلك طيف ترددي عريض (ضمن حزمة الضوء) وينشأ من ذلك الضوء الأبيض.

أما الفوتونات فوق البنفسجية (Ultraviolet) فيمتد مجالها الترددي من (8×10^{14}Hz) إلى (3.4×10^{16}Hz) ويتم إنتاجها عندما يقفز إلكترون قفزة طويلة إلى الأسفل ضمن الذرة من حالة إثارة عالية. يؤثر المجال الترددي للفوتونات فوق البنفسجية تأثيراً سلبياً على خلايا DNA البشرية مما قد يؤدي إلى سرطان الجلد. تنتج الشمس كمية كبيرة من الأشعة فوق البنفسجية، ولحسن الحظ فإن طبقة الأوزون (Ozone) في الغلاف الجوي الخارجي تمتص جزءاً كبيراً من الأشعة فوق البنفسجية وتحول طاقة الأشعة فوق البنفسجية إلى طاقة مهتزة في جزيئات الأوزون.

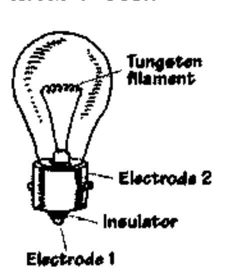
تعتبر أشعة X فوتونات عالية الطاقة ويمتد مجالها الترددي من (2.4×10^{16}Hz) إلى (5×10^{19}Hz) مما يجعل طول موجتها أصغر من قطر الذرة، ويتم توليد أشعة X بإرغام جسيم مشحون عالي السرعة على التباطؤ المفاجئ. تستخدم أشعة X للتصوير الشعاعي في المجالات الطبية وغيرها.

أما أشعة غاما (Gamma rays) فهي أكثر الفوتونات طاقة وتبدأ تردداتها من (5×10^{19}Hz) ويتم إنتاجها بواسطة جسيمات تخضع لانتقالات وتحركات ضمن نواة الذرة، ومن الصعب جداً ملاحظة الطبيعة شبه الموجية لأشعة غاما.

2.5: المصابيح

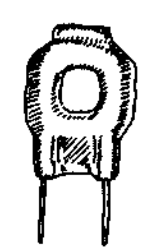
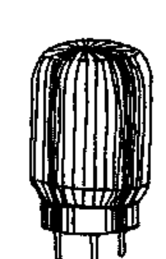
المصابيح هي أدوات تحول التيار الكهربائي إلى قدرة ضوئية، وتعتمد إحدى طرق التحويل على تمرير التيار الكهربائي عبر فتيل سلكي من نوع خاص، ونتيجة لتصادم التيار مع ذرات الفتيل، فإن الفتيل يسخن ويصدر فوتونات (وطبعاً يتم إنتاج فوتونات بأطوال موجات مختلفة، ولذلك يبدو أن الضوء الصادر هو ضوء أبيض). وهناك طريقة ثانية لتحويل التيار الكهربائي إلى قدرة ضوئية وتتلخص هذه الطريقة بوضع زوج من الأقطاب في حبابة زجاجية مملوءة بالغاز بحيث تكون المسافة بين الأقطاب قصيرة وعند تطبيق جهد بين الأقطاب يتشرد (تيأيّن ionize) الغاز، أي تخرج إلكترونات من ذرات الغاز، ويتم بهذه العملية إصدار فوتونات. ونبين فيما يلي عرضاً لبعض الأنواع الأساسية من المصابيح.

المصباح المتوهج



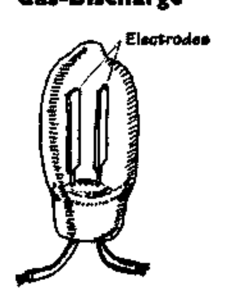
يستخدم في هذه المصابيح فتيل من سلك التنغستين لإنتاج ضوء متوهج أبيض عند مرور التيار في الفتيل. يوضع الفتيل في حبابة زجاجية مملوءة بغاز كغاز الأرغون (argon)، أو الكريبتون (Krypton) أو النيتروجين (nitrogen)، لأن الغاز يساعد على زيادة نصوع المصباح ويمنع احتراق الفتيل، (يحترق الفتيل بسرعة لو كان الوسط المحيط به غنياً بالأوكسجين. تستخدم المصابيح المتوهجة في الأضواء المتقطعة (الوماضة)، وفي إنارة المنازل، وكأنوار دلالة. تتوفر هذه المصابيح بحجوم، وأشكال، وتيارات وجهود مختلفة وباستطاعات إضاءة مختلفة (تقدر استطاعة الإضاءة بالشمعة الضوئية (Candlelight).

مصباح الهالوجين

تؤمن هذه المصابيح إضاءة بلمعان شديد جداً (Ultra bright)، وبعكس المصابيح العادية فإن الفتائل تُغلَّف بالحبابة الكوارتزية وفي هذه الحبابة يوجد غاز هالوجين كغاز البرومين (bromine) أو غاز الأيودين (Iodine). تستخدم هذه المصابيح كمصابيح بروجيكتورات، وفي المصابيح الأمامية للسيارات وفي غيرها من التجهيزات.

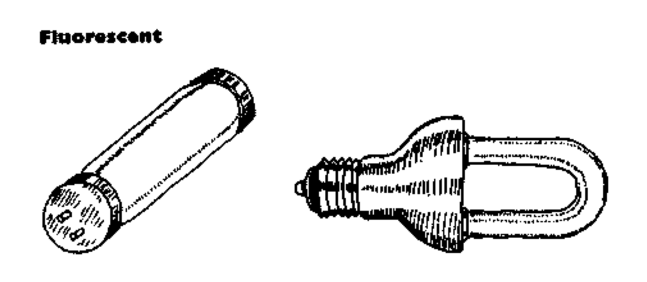
مصباح التفريغ الغازي



الشكل (3.5)

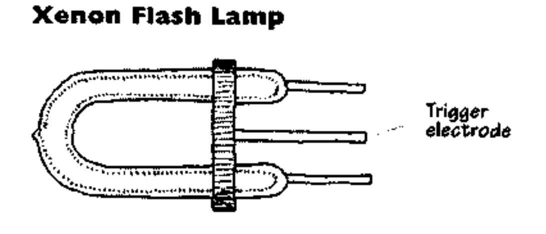
تعطي هذه المصابيح إضاءة قليلة تنتج عن تأيُّن جزيئات الغاز بين الأقطاب ضمن الحبابة الزجاجية. تتوفر أنواع عديدة من هذه المصابيح وتسمى باسم الغاز الموجودة ضمن الحبابة كمصابيح النيون (neon)، والــ Xenon الومضي ومصابيح بخار الزئبق. تنتقل هذه المصابيح آلياً إلى حالة on عندما تصل قيمة الجهد المطبق عليها إلى جهد التشغيل الأصغري ولذلك تستخدم في بعض تطبيقات القدح (Triggering) وتنظيم الجهد، كما تستخدم كمصابيح دلالة في الأجهزة ولاختبار وجود الجهد في المآخذ المنزلية.

مصباح الفلوريسانت



يتكون هذا النوع من المصابيح من أنبوب زجاجي مملوء ببخار الزئبق وسطحه الداخلي مطلي بمادة فلوريسانتية. توجد في نهايتي الأنبوب فتائل مصعد ومهبط، وعندما يتم إصدار الإلكترونات من المهبط تتصادم هذه الإلكترونات مع ذرات الزئبق ويتم إصدار أشعة فوق البنفسجية (UV) وتتصادم هذه الأشعة مع المادة الفلوريسانتيه ويتم إصدار ضوء مرئي. تحتاج هذه المصابيح إلى لمبة متوهجة مساعدة (auxiliary glow lamp) بتماسات ثنائية المعدن وإلى خانق (choke) على التوازي مع المهبط والمصعد من أجل إثارة التفريغ ضمن المصباح الفلوريسانتي. تعتبر المصابيح الفلوريسانتيه ذات كفاءة عالية في الإضاءة وتستخدم في إنارة المنازل.

مصباح Xenon الومضي



هذا المصباح هو مصباح تفريغ غازي مملوء بغاز الـ Xenon الذي يتأين عند تطبيق جهد معين على أقطاب (أطراف) المصباح. لهذا المصباح ثلاثة أطراف، مصعد ومهبط وطرف لجهد القدح، وفي العادة يطبق جهد معين بين المصعد والمهبط ويبقى المصباح في حالة عدم إضاءة (Off)، وعند تطبيق جهد على طرف القدح فإن الغاز يتأين فجأة ويصدر ومضة ذات لمعان عالٍ جداً (extrenmely bright flash). تستخدم هذه المصابيح في آلات التصوير وفي التطبيقات التي تحتاج إلى إضاءة ذات تأثير خاص.

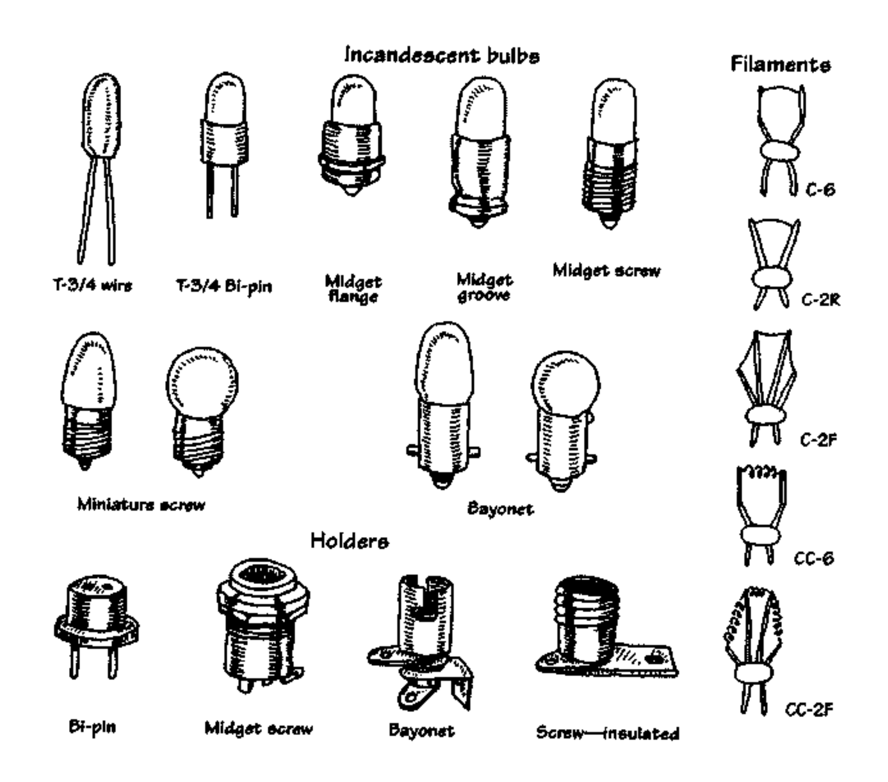
أمور تقنية تخص مصابيح الإضاءة

يُقاس سطوع المصباح بما يُسمى استطاعة الشمعة الكروية الوسطى (MSCP) (mean spherical candle power). يضع صانعو المصابيح المصباح في مركز كرة تعطي القيمة الوسطى للضوء الساقط على سطحها، وتتعلق قيمة MSCP لمصباح معين بالحرارة اللونية (Color Temperature) لسطح إصدار فتائل المصباح. يتضاعف رقم الـ (MSCP) عند حرارة معينة بمضاعفة سطح الفتائل. إن معدلات الجهد والتيار هي من الأمور التقنية (الفنية) التي يجب أخذها بالاعتبار عند التعامل مع المصابيح. يبين الجدول (5-1) المواصفات النموذجية لمصباح توهج واحد وذلك كمثال على المواصفات التي توجد في جداول المصابيح.

الجدول (5-1): بعض مواصفات أحد مصابيح التوهج

نوع الفتائل	زمن الحياة المتوقع بالساعة	MSCP للفتائل	Life AMPS	الجهد التصميمي	MNFR #
C-2R	15	0.800	0.500	2.38	PR2

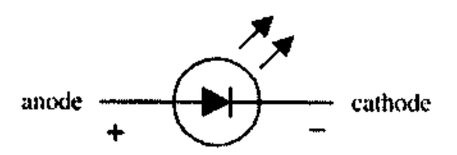
أما الشكل (5-4) فيبين عدداً من النماذج المختلفة للمصابيح.



الشكل (4.5): نماذج مختلفة من المصابيح.

3.5: الديودات المصدرة للضوء

الديودات المصدرة للضوء (LEDs) هي عناصر لها طرفان وتشبه ديودات متصلات الـــ (Pn)، إلا أنها مصممة لإصدار ضوء مرئي أو أشعة تحت الحمراء. عندما يكون جهد مصعد الـــ (LED) أكبر من جهد مهبطة بحوالي (0.6V إلى 2.2v) فإن تياراً يمر من المصعد إلى المهبط ويتم إصدار الضوء، أما إذا كانت القطبية معكوسة، أي المهبط أكثر إيجابية من المصعد فإن الـــ LED لا يمرر ولا يصدر ضوءاً. يبين الشكل (5-5) رمز الديود المصدر للضوء.



الشكل (5.5): رمز الديود المصدر للضوء

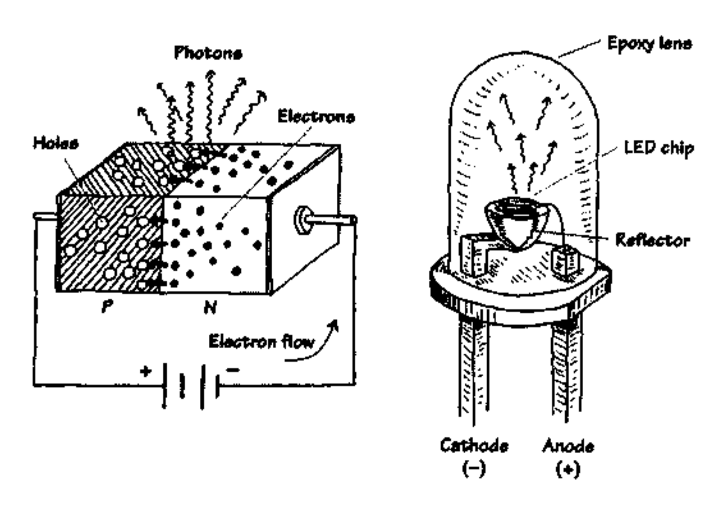
يعطي الـــ LED إضاءة محددة اللون (فوتونات ذات لون خاص) وذلك بعكس المصابيح العادية التي تعطي فوتونات متعددة الألوان تتداخل مع بعضها لتعطي اللون الأبيض، والألوان الشائعة التي تصدرها الـــ LEDs هي الأحمر والأخضر والأصفر هذا طبعاً بالإضافة إلى الأشعة تحت الحمراء.

تستخدم الـــ LEDs عادة لإعطاء إضاءة دلالة، وكذلك في بعض التطبيقات التي تحتاج إلى إضاءات ضعيفة (كأضواء إشارة دراجة مثلاً)، أما الديودات المصدرة للأشعة تحت الحمراء فتستخدم كعناصر مرسلة في دارات التحكم عن بعد.

(كما في جهاز التحكم بالتلفزيون مثلاً)، والعنصر المستقبل للإشارة المرسلة يمكن أن يكون ترانزستوراً ضوئياً يستجيب لتغيرات ضوء LED مرسل ويغير بذلك تيار دارة الاستقبال وفقاً للإشارة المرسلة.

1.3.5: كيف يعمل الديود المصدر للضوء

يصنع الديود المصدر للضوء من مادة (p) ملتحمة مع مادة (n) وتشكل المادتان متصل (pn). عندما يكون المتصل (pn) مستقطباً باتجاه أمامي تثار الإلكترونات في المنقطة (n) وتنتقل عبر المتصل إلى المنطقة (p) حيث تلتقي هناك بالثقوب وعندما تلتقي الإلكترونات مع الثقوب يتم إصدار فوتونات. يُغلف المتصل pn في الديودات المصدرة للضوء بطبقة خارجية مشابهة بجسيمات مبعثرة للضوء كي تشتت الضوء فيبدو الديود المصدر للضوء شديد السطوع، وعادة يوضع عاكس تحت المادة نصف الناقلة كي يوجه الضوء إلى الأعلى. تُصنع أطراف المصعد والمهبط من ناقل عالي المعيار (heavy-guage) كي تساعد على تبديد الحرارة عن المادة نصف الناقلة.

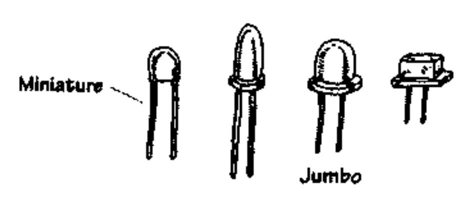


الشكل (5-6): بنية ديود مصدر للضوء وشكله المكبّر.

2.3.5: أنواع الديودات المصدرة للضوء

ديودات الضوء المرئي

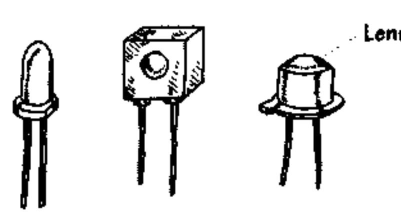
هي عناصر مصدرة للضوء المرئي، ورخيصة الثمن وذات استمرارية جيدة في العمل وتستخدم كأضواء دلالة (Indicator Lights)، الألوان الشائعة التي تصدرها هذه الديودات هي الأخضر (565nm)، الأصفر (585nm)، البرتقالي (615nm)، والأحمر (650nm). يبلغ الجهد الأمامي الأعظمي لهذه الديودات (1.8V)، أما تيارات التشغيل النموذجية فهي تتراوح بين (1mA) إلى (3mA). تتراوح مستويات السطوع النموذجية بين (1) إلى (3mcd/1mA) إلى (3mcd/2mA). تتوفر ديودات مصدرة للضوء عالية السطوع وتستخدم كوماضات عالية السطوع (كما في الوماضات التي تستخدم في الدراجات العادية (bicycle Flashers).



الشكل (7.5): أنواع الديودات الضوئية.

ديودات الأشعة تحت الحمراء

Infrared LEDs

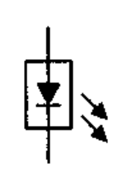


تُصمم هذه الديودات لإصدار فوتونات تحت حمراء بأطول موجة بين (880) و(940) نانومتر (nm). تستخدم هذه الديودات مع حساس ضوئي (كمثال ديود ضوئي، مقاومة ضوئية، أو ترانزستور ضوئي) في دارات التحكم عن بعد (كما في دارات التحكم عن بعد بأجهزة التلفزيون TV، وفي دارات الإنذار عن دخول شخص غير مخول إلى مكان محروس بالأشعة). زاوية إصدار الأشعة تحت الحمراء لهذه الديودات أصغر من زوايا الإصدار الضوئي لديودات إصدار الضوء العادية LEDs، وبذلك يمكن توجيه المعلومات المرسلة بكفاءة أكبر. يُعبر عن الخرج الفوتوني لديودات الأشعة تحت الحمراء من خلال نسبة استطاعة الخرج على التيار الأمامي، وتتراوح هذه القيم بين (0.50mW/20mA) و(8mW/50mA). تتراوح قيم الجهد الأمامي الأعظمي عند تيار أمامي محدد بين (1.60V) عند (20mA) و(2.0V) عند (100mA).

الديودات الضوئية الوماضة

Blinking LEDs

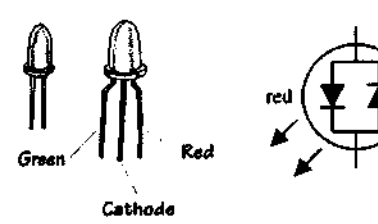




تحوي هذه الديودات الضوئية ضمن غلافها على دارة متكاملة صغرية تجعل الديود يومض بمعدل (1) إلى (6) مرات في الثانية. تستخدم هذه الديودات كوماضات بيان، ويمكن استخدامها أيضاً كهزازات بسيطة (Simple Oscillators).

الديودات الضوئية ثنائية الألوان

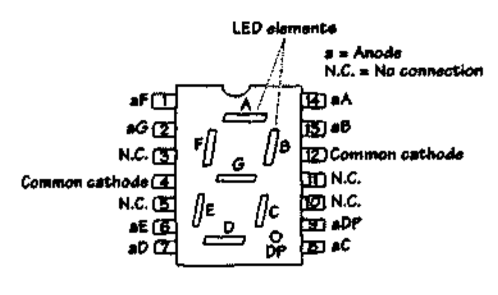
Tricolor LEDs



تعمل هذه الديودات كديودين ضوئيين موصولين على التوازي والتعاكس، وغالباً ما يكون أحد الديودات أحمر أو برتقالي، أما الديود الآخر فيكون أخضر. عند مرور التيار في الديود في احد الاتجاهات يمرر أحد الديودين التيار ويكون الآخر في حالة قطع (Off)، وعند مرور التيار بالاتجاه المعاكس ينتقل الديود الذي كان سابقاً في حالة (Off) إلى حالة (On) والذي كان (On) إلى حالة (Off). تستخدم هذه الديودات كمبينات للقطبية وتتوفر بمعدل جهد أعظمي 3V وبتيار يتراوح بين (10) و(20mA).

وحدات الإظهار المكونة من قطاعات، كل واحد منها ديود مصدر للضوء

LED Displays



تابع الشكل (7.5): أنواع الديودات الضوئية.

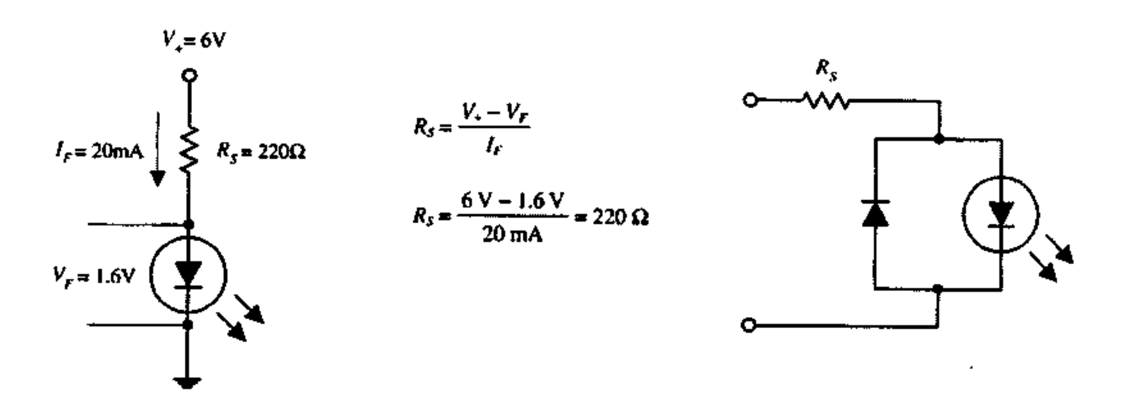
تستخدم هذه الوحدات لإظهار الأرقام (numbers) والمحارف (characters)، وفي وحدة الإظهار المبينة على الشكل تستخدم سبعة ديودات مصدرة للضوء (LEDs) في تكوين وحدة الإظهار. عند تطبيق جهد مناسب بين طرفي أحد القطاعات فإن القطاع يُضيء. تعتبر وحدات الإظهار المكونة من ديودات مصدرة للضوء أكثر متانة من وحدات الإظهار التي تعمل على الكريستال السائل (LCDs) ولكنها تستهلك طاقة أكبر. سوف نُناقش وحدات الإظهار بتفصيل أكثر في الملحق (I).

3.3.5: معطيات فنية للديودات المصدرة للضوء (LEDs)

الديودات المصدرة للضوء (LEDs)، مثلها مثل الديودات pn العادية، هي عناصر تتعلق بالتيار، ومن أجل ضبط مقدار إضاءة الـ LED يتم تغيير التيار الأمامي الذي يمر عبر الديود (I_F)، (I_F Forward Current)، والتيار الأعظمي (100mA). ولكن يمكن أن يتحمل الديود الضوئي نبضات تيارية أعلى تصل أحياناً إلى (10A). توصل مع الـ LED مقاومة تسلسلية لحمايته من التيار الزائد وتتعلق قيمة المقاومة بالجهد الأمامي المطبق على الـ LED -يُرمز للجهد الأمامي بالرمز (V_F)- وكذلك يُرمز لجهد التغذية بالرمز ($V+$) أما التيار الأمامي المرغوب فيرمز له بالرمز (I_F).

ولإيجاد قيمة المقاومة يطبق قانون أوم على دارة الشكل (5-8).

$$R_S = \frac{V_+ - V_F}{I_F} = \frac{6V - 1.6V}{20mA} = 220\Omega$$



الشكل (8.5): مقاومة تحديد التيار المار في LED وحمايته من الجهد العكسي.

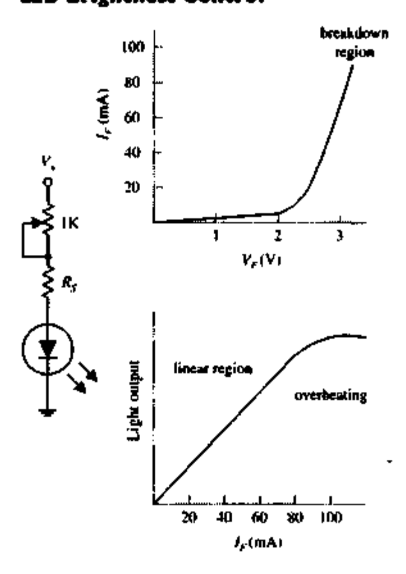
للديود المصدر للضوء LED جهد عكسي أعظمي مسموح (كباقي الديودات) وإذا زاد الجهد العكسي المطبق على الديود عن هذا الجهد فإن الديود ينهار ويتعطل وقيمة الجهد العكسي الأعظمي للديودات الضوئية منخفضة نسبياً (حوالي 5V). ولحماية الديود المصدر للضوء من الجهود العكسية يوصل على التوازي والتعاكس معه ديود عادي كما في الشكل (5-8) حيث ينتقل هذا الديود إلى حالة (On) قبل أن يصل الجهد العكسي بين طرفي الديود المصدر للضوء إلى قيمة خطرة. يجب أن تلاحظ أن هبوطاً في الجهد يحدث على الديود الضوئي عندما يكون في حالة (On) في دارة ما وهبوط الجهد هذا ناتج عن المتصل (pn) الذي يتشكل منه هذا الديود وتتراوح قيمة هبوط الجهد على الديود الضوئي من (0.6V) إلى (2.2V) ويتعلق ذلك بنوع المادة نصف الناقلة المكونة للديود الضوئي. يبين الجدول (5-2) قائمة ببعض المواصفات النموذجية لبضعة أنواع من الديودات الضوئية.

الجدول (2-5): المواصفات النموذجية لبعض الديودات المصدرة للضوء.

الرقم والرمز MNFR#	نوع الديود الضوئي	نوع الغلاف	زاوية الإصدار بالدرجة	اللون	شدة الإضاءة (MCD) I_V	الجهد الأمامي النموذجي (V) V_F	جهد الانهيار العكسي الأعظمي (V) V_R	التيار الأمامي الأعظمي (mA) I_F	تبديد الاستطاعة الأعظمي PD mw P_D
NTE 3000	دلالة (indicator)	T-3/4	80	أحمر	1.4	1.65	5	40	80
NTE 3010	دلالة (indicator)	T-1	90	أخضر	1	2.2	5	35	105
NTE 3026	ثلاثي الحالة	T-1 3/4	50	أحمر/ أخضر	1.5 أحمر	1.65 أحمر	-	70 أحمر	200
					0.5 أخضر	2.2 أخضر	-	35أخضر	
NTE 3130	وماض 3Hz	T-1 3/4	30	أصفر وماض	3	5.25	0.4	20	-
NTE 3017	ديود مصدر للأشعة تحت الحمراء	-	-	900 nm	-	1.28	6	100	175

4.3.5: دارات LED أساسية

التحكم بسطوع إضاءة LED

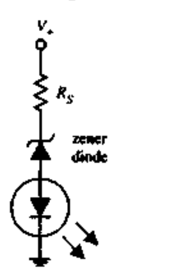


تستخدم في الشكل المبين جانباً مقاومة متغيرة 1KΩ للتحكم بمقدار التيار الذي يمر عبر الـ LED وبالتالي للتحكم بسطوع الإضاءة. تستخدم المقاومة Rs لحماية الديود LED من التيار الزائد وتحسب من العلاقة:

$$R_S = \frac{V_+ - V_F}{I_F}$$

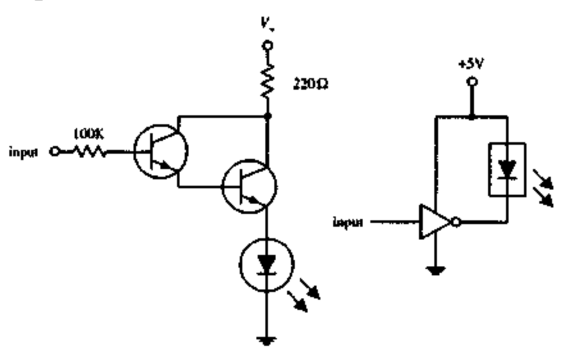
عندما يبدأ الـ LED بتمرير التيار يزداد هبوط الجهد عليه بالتدريج أما التيار فيزداد بشكل أكثر سرعة. عند مرور تيار كبير جداً في الديود المصدر للضوء فإن حرارته تزداد ويتخرب.

مبين مستوى الجهد



يبين الشكل ديود مصدر للضوء LED موصولاً على التسلسل مع زينر ومقاومة Rs، ويمكن استخدام هذه الدارة البسيطة كمبين لمستوى الجهد. عندما يكون (V+) أكبر من جهد الانهيار للزينر فإن لزينر يمرر ويمر التيار عبر الـ LED. تتوفر ثنائيات الزينر بجهود انهيار مختلفة لذلك من الممكن وصل عدد من هذه الدارات على التوازي لتشكيل دارة كاشف أو مبين مستوى جهد.

مجسات منطقية

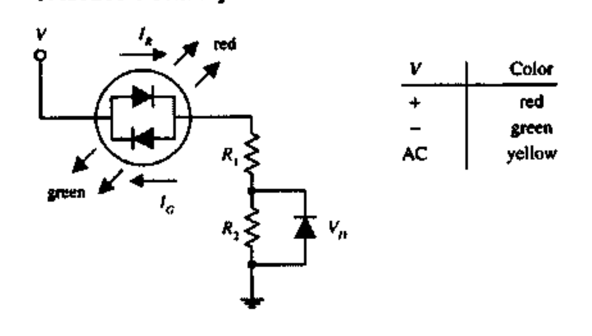


تبين هذه الدارة كيفية استخدام LED لإظهار حالة بوابة منطقية، فعند وصل خرج البوابة المنطقية إلى دخل هذه الدارة، نلاحظ أن الديود المصدر للضوء LED يعمل عندما يكون خرج البوابة على حالة (high) لأن الترانزستورات عندها تكون في حالة (On)، أما إذا كان خرج البوابة على حالة (Low) فإن الترانزستورات تكون في حالة (Off) ولا يمر تيار عبر الـ LED. تبين الدارة اليمينية كيفية استخدام LED ومَّاض (Flasher LED) للقيام بنفس العمل. تعمل هذه الدارة مع بوابات TTL ومع بوابات CMOS ذات الخرج العالي.

الشكل (9.5): دارات الـ LED الأساسية.

مبين قطبية ثلاثية الحالة

يُستخدم في هذه الدارة ديود LED ثلاثي الحالة لبيان اتجاه ونوع تدفق التيار. إذا كان (V) جهداً مستمراً موجباً فإن الـــ LED يصدر ضوءاً أحمر، أما إذا كان (V) جهداً مستمراً سالباً فإن الـــ LED يصدر ضوءاً أخضر. أما إذا طبق على الدارة جهد متناوب عالي التردد فإن الـــ LED يصدر ضوءاً أصفر. تستخدم المقاومات (R1) و(R2) لحماية الديود المصدر للضوء أما الديود العادي فيؤمن حماية للـــ LED من الجهد العكسي عندما يتجاوز الجهد العكسي المطبق على الـــ LED القيمة العظمى المسموحة، وتبين المعادلات التالية كيفية حساب R1 وR2.





$$R_1 = \frac{V - (V_G + V_D)}{I_G} \qquad R_2 = \frac{V - V_R}{I_R} - R_1$$

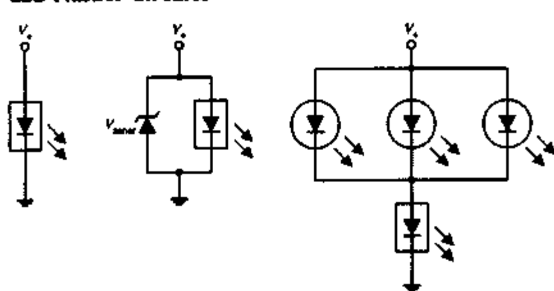
V: الجهد المطبق على الدارة.

V_G, V_R: الجهد الأمامي للـــ LED، G للأخضر، R للأحمر.

V_D: الجهد الأمامي للديود العادي ويساوي تقريباً (0.6V).

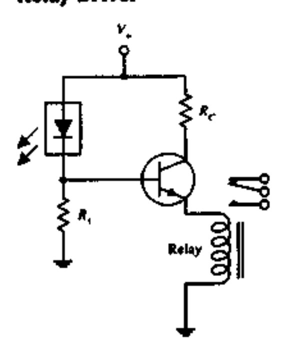
دارات LED ومّاض

يحتاج الـــ LED الوماض إلى مقاومة تحديد تيار كالديودات الأخرى المصدرة للضوء، ويستخدم عادة جهد بين (3V) و(7V) لقيادة الـــ LED الوماض. يُستخدم ثنائي (ديود) زينر لحماية الـــ LED الوماض من الجهد الأمامي الزائد ويوصل الزينر مع الـــ LED الوماض كما في الشكل على التوازي والتعاكس، وعادة يتم اختيار قيمة جهد انهيار الزينر حوالي (6V). يمكن كما في الشكل استخدام LED وماض واحد لجعل مجموعة LEDs عادية تومض معه.



قائد حاكمة

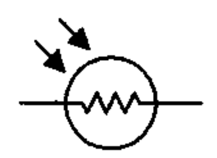
يُستخدم في هذه الدارة ديود LED وماض لتأمين سلسلة من النبضات التيارية لقاعدة الترانزستور. عندما ينتقل الـــ LED الوماض إلى حالة (On) يُطبق على قاعدة الترانزستور جهد موجب ويمر في قاعدته تيار يقوده إلى حالة (On) فيمر تيار عبر ملف الحاكمة وتُفعل الحاكمة. تحدد R_1 جهد قاعدة الترانزستور، أما R_C فتحدد تيار المجمع.



تابع الشكل (9.5): دارات الـ LED الأساسية.

4.5: المقاومات الضوئية

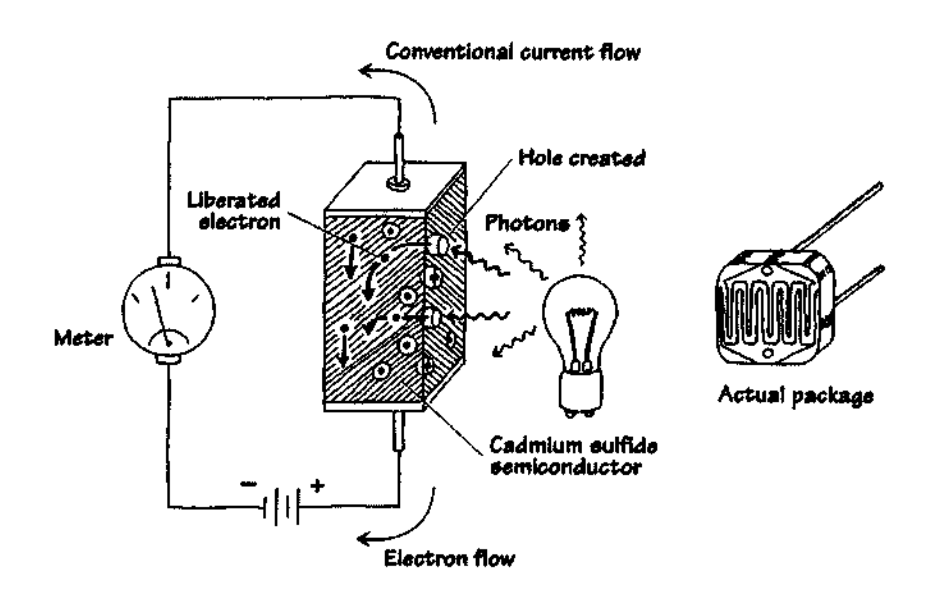
المقاومات الضوئية هي مقاومات متغيرة متحكم بها ضوئياً، وتكون قيمة المقاومة الضوئية عالية جداً (من مرتبة الميغا أوم $10^9\Omega$) عند وضعها في الظلمة، ولكن قيمة المقاومة تنخفض كثيراً عند تعرضها للإضاءة، وربما تنخفض قيمتها إلى بضع مئات الأومات ويتعلق ذلك طبعاً بشدة الإضاءة. تستخدم المقاومات الضوئية في دارات المفاتيح التي تُفعل في الظلمة أو في الضوء، وفي دارات الكواشف الحساسة للضوء. يبين الشكل (5-10) رمز المقاومة الضوئية.



الشكل (10.5): رمز المقاومة الضوئية.

1.4.5: كيف تعمل المقاومة الضوئية

تُصنع المقاومات الضوئية من أنواع خاصة من البللورات نصف الناقلة، مثل كبريت الكادميوم (Cadmium-Sulfide) للمقاومات الضوئية العادية وكبريت الرصاص (Lead-Sulfide) للمقاومات التي تعمل بالأشعة تحت الحمراء. عند وضع هذه المقاومات في الظلام فإن الإلكترونات لا تتحرك في البنية البللورية للمادة لأنها تكون شديدة الارتباط بذرات البللورات، ولكن وعند سقوط الضوء على المقاومة فإن الفوتونات تصطدم مع الإلكترونات المرتبطة بالذرات وتحرر الإلكترونات من روابطها وتخلق مكان الإلكترونات المحررة ثقوباً. تشارك الإلكترونات الحرة في تمرير التيار عبر المقاومة التي تصبح قيمتها عندئذ منخفضة.



الشكل (11.5): توضيح مبدأ عمل المقاومة الضوئية.

2.4.5: معطيات (معلومات) فنية

قد تحتاج المقاومات الضوئية إلى بضعة ميللي ثانية أو أكثر كي تستجيب بالكامل للتغيرات الضوئية، كما أنها قد تحتاج إلى بضعة ثوانٍ لتعود إلى قيمتها الطبيعية (قيمة مقاومتها في الظلام) حال انتهاء الإضاءة.

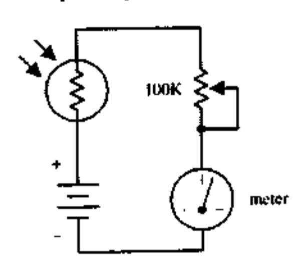
تستخدم المقاومات الضوئية في كافة التطبيقات اعتماداً على نفس المبدأ وهو تغير قيمة المقاومة وفقاً لشدة الإضاءة، ولكن الحساسية ومجال التغير يختلفان طبعاً من مقاومة لأخرى. وبالتالي فإن بعض المقاومات قد تستجيب أفضل لفوتونات بطول موجة محدد من الطيف.

تستجيب مقاومات كبريت الكادميوم بشكل أفضل للضوء الذي طول موجته من (400) إلى (800 nm)، أما مقاومات كبريت الرصاص فتستجيب بشكلٍ أفضل لفوتونات الأشعة تحت الحمراء.

3.4.5: تطبيقات

مقياس ضوء بسيط

تستخدم في هذه الدارة مقاومة ضوئية كعنصر حساس للضوء في دارة مقياسٍ بسيط للضوء. في حالة الظلام تكون المقاومة الضوئية عالية جداً ويمر تيار صغير في الدارة التسلسلية ويكون انحراف مؤشر المقياس عند قيمته الدنيا. عند تطبيق منبع ضوئي بسطوع متزايد على المقاومة، تبدأ المقاومة بالانخفاض ويمر تيار أكبر عبر الدارة التسلسلية ويبدأ مؤشر المقياس بالانحراف. يُستخدم مقسم الجهد من أجل معايرة المقياس.

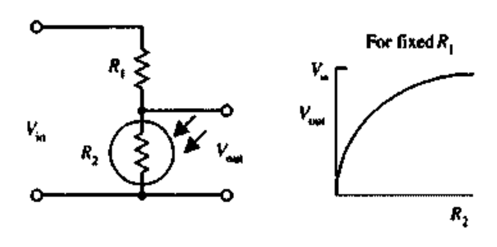


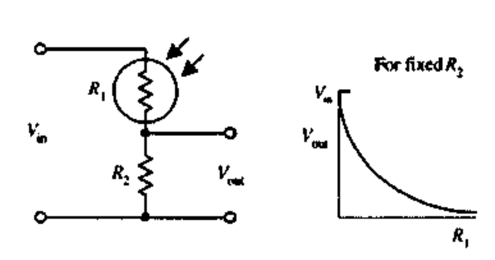
مقسم جهد حساس للضوء

هذه الدارة تشبه مقسم الجهد المشروح في الفصل الثالث، ويُعطى جهد الخرج بالعلاقة:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in}$$

بزيادة شدة الإضاءة تنخفض قيمة المقاومة الضوئية وينخفض V_{out} في الدارة العلوية، أما في الدارة السفلية فإن V_{out} يزداد كلما زادت شدة الإضاءة.

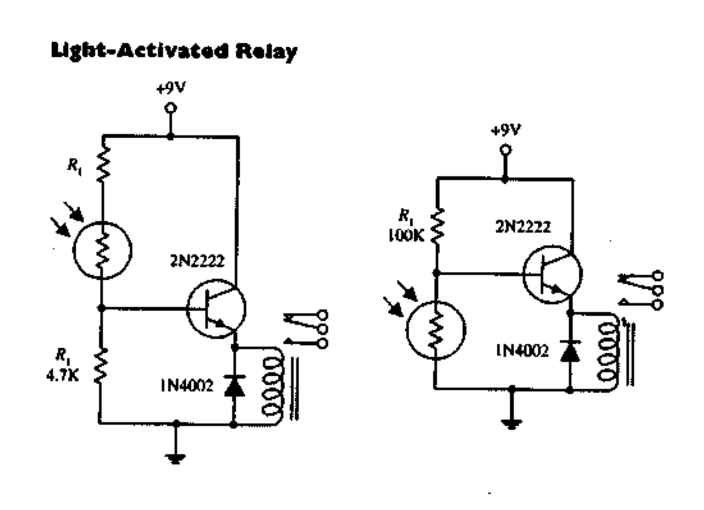




الشكل (12.5): مقسم جهد حساس للضوء.

حاكمة تفعّل ضوئياً

تستخدم هذه الدارات مقسمات جهد حساسة للضوء ففي الدارة اليسارية إذا كانت الإضاءة غير كافية تكون قيمة المقاومة الضوئية عالية جداً ويمر تيار صغير جداً عبرها وبالتالي يكون تيار قاعدة الترانزستور صغيراً ولا يكفي لنقله إلى حالة (On) فيبقى في حالة قطع (Off) ولا تعمل الحاكمة ومع سقوط الضوء على المقاومة الضوئية تنخفض قيمتها ويزداد التيار المار عبرها فيزيد تيار القاعدة وجهدها وعند وصول قيم تيار وجهدها القاعدة إلى الوضع الكافي لتشغيل الترانزستور ينتقل الترانزستور إلى حالة (On). فيمر تيار في مجمعه ويمر تيار في باعثه عبر ملف الحاكمة وتفعل الحاكمة.

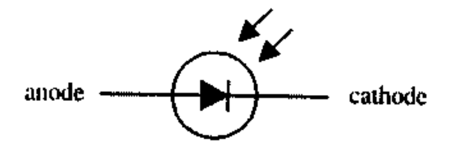


تابع الشكل (12.5): مقسم جهد حساس للضوء.

أما الدارة اليمينية فهي دارة تفعل في الظلمة وتعمل وفق نفس مبدأ الدارة السابقة ولكن بالعكس. قيمة (R1) في الدارة التي تفعل في الإضاءة هي حوالي (1KΩ)، ولكنها قد تحتاج بعض الضبط، أما قيمة R1 في الدارة التي تفعل في الظلام فهي حوالي (100KΩ) وتحتاج أيضاً لضبط. يمكن استخدام حواكم (6) إلى (9V) في الدارتين بملفات ذات مقاومة 500Ω.

5.5: الديودات الضوئية

الديودات الضوئية هي عناصر ذات طرفين تحول الطاقة الضوئية (طاقة الفوتون) إلى تيار كهربائي. إذا تم وصل طرفي الديود الضوئي مع بعض ووضع الديود في الظلام لا يمر تيار في دارة الديود، ولكن وعند إضاءة الديود، فإن هذا الديود يصبح مصدراً لتيار صغير ويُضخ التيار من المهبط عبر السلك إلى المصعد. يبين الشكل (5-13) رمز الديود الضوئي.



الشكل (13.5): رمز الديود الضوئي.

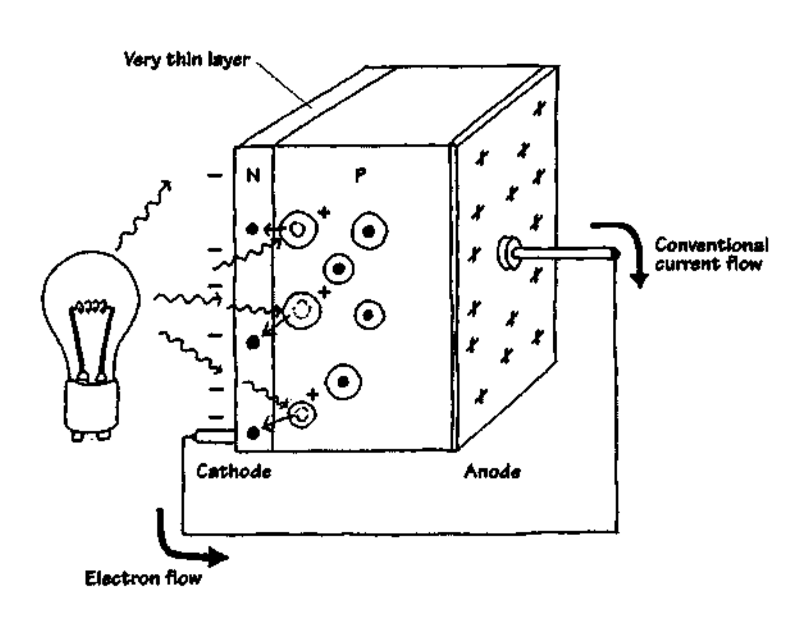
تستخدم الديودات الضوئية عادة لكشف نبضات الأشعة تحت الحمراء التي تستخدم في الاتصالات اللاسلكية، كما توجد أيضاً في دارات مقاييس الضوء (مثل مقاييس الضوء في الكاميرات وفي أجهزة الإنذار وغيرها) وذلك لأنها ذات استجابة ضوئية- تيارية خطية.

1.5.5: كيف يعمل الديود الضوئي

يُصنع الديود الضوئي بتشكيل التحام بين طبقة نوع (n) رقيقة جداً مع طبقة نوع (p) سميكة. (تحوي الطبقة (n) على فائضاً من الإلكترونات الحرة أما الطبقة (P) فتحوي فائضاً من الثقوب). تسمى الطبقة (n) باسم المهبط أما الطبقة (p) فتسمى المصعد. عند إشعاع ضوء على العنصر فإن عدداً من الفوتونات سوف يمر عبر نصف الناقل (n) إلى نصف الناقل

(p)، وهذه الفوتونات تصطدم بالإلكترونات مرتبطة مع ذراتها في المادة (p) فتحرر هذه الإلكترونات من روابطها وتترك مكانها ثقوب-الإلكترونات المتحررة تعبر المتصل وتحصل بالنتيجة على إلكترونات إضافية في المنطقة (n) وعلى ثقوب إضافية في المنطقة (P). يؤدي هذا الفصل لحوامل الشحنات إلى نشوء فرق في الكمون (Potential) على المتصل (pn).

إذا وصل سلك من المهبط (المنطقة n) إلى المصعد (المنطقة p)، فإن الإلكترونات سوف تمر عبر السلك من المهبط إلى المصعد، ويمر تيار موجب من المصعد إلى المهبط. يُوضع المتصل pn في الديودات الضوئية التجارية ضمن غلاف بلاستيكي أو معدني له نافذة، ويمكن أن تحتوي النافذة على عدسة مكبرة ومرشح.

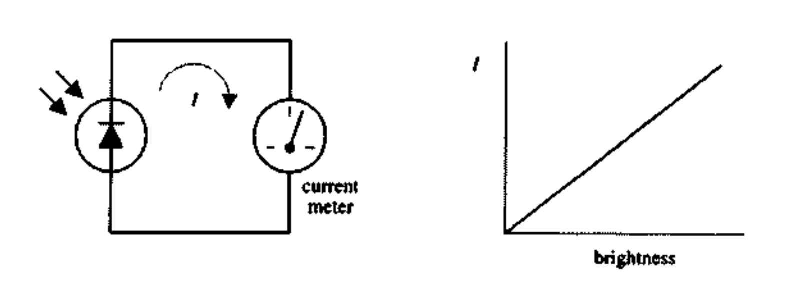


الشكل (14.5): بنية ومبدأ عمل الديود الضوئي.

2.5.5: التطبيقات الأساسية للديود الضوئي

منبع تيار كهروضوئي

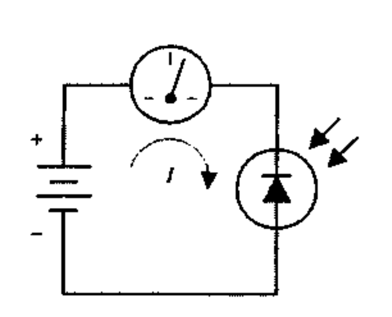
يبين الشكل (5-15) ديوداً ضوئياً يعمل على تحويل طاقة الضوء مباشرة إلى تيار كهربائي يمكن قياسه بواسطة مقياس، والعلاقة بين شدة الضوء الساقط على الديود (والذي يسمى ضوء الدخل input light) وبين تيار الخرج هي تقريباً خطية. تسمى هذه الدارة باسم منبع تيار كهروضوئي (Phototovoltaic current source).



الشكل (15.5): دارات التطبيقات الأساسية لديود ضوئي.

الديود الضوئي كعنصر تمرير ضوئي

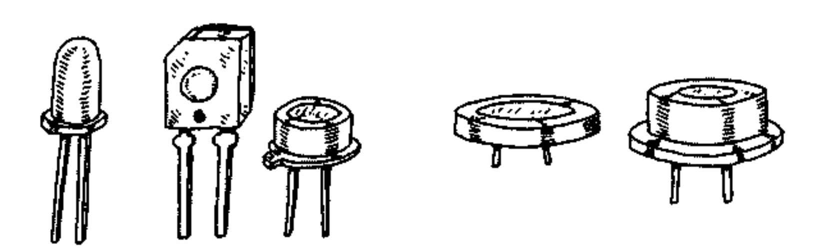
قد لا تكفي الديودات الضوئية بمفردها لإنتاج التيار الكافي واللازم لقيادة دارة خاصة حساسة للضوء، لذلك توضع هذه الديودات مع منبع جهد خارجي في دارة واحدة وفي الدارة المبينة في الشكل (5-15) يوصل ديود ضوئي مستقطب عكسياً مع بطارية. في حالة الظلمة يمر تيار صغير جداً (من مرتبة الـ nA) عبر الديود ويسمى هذا التيار بتيار العتمة (dark current). عند سقوط ضوء على الديود يمر تيار كبير عبر الديود. تستخدم البطارية في هذه الدارة لزيادة التيار المار. يمكن وصل مقاومة بين البطارية والمقياس الموجود في الدارة من أجل معايرة المقياس. لاحظ أنه إذا تم اعتبار الديود الضوئي كديود عادي فإن الدارة لن تمرر التيار نهائياً، وكي يمر تيار -إذا كان الديود عادياً- يجب أن يوصل بالاتجاه المعاكس.



تابع الشكل (5-15): دارات التطبيقات الأساسية لديود ضوئي.

3.5.5: أنواع الديودات الضوئية

تتوفر الديودات الضوئية بأشكال وحجوم مختلفة فبعضها يكون مزوداً بعدسة ضمن غلاف الديود وبعضها الآخر مزود بمرشح ضوئي. تُصمم بعض الديودات الضوئية بحيث تكون سريعة الاستجابة، كما أن بعض أنواع الديودات الضوئية تكون ذات سطح واسع من أجل الحساسية العالية، أما البعض الآخر فمساحة السطح الذي يُعرض للضوء فيها صغيرة. عند زيادة السطح المعرَّض للضوء في الديود ينخفض زمن الاستجابة. يبين الجدول (5-3) عيِّنة من مواصفات الديودات الضوئية.



الشكل (5-16): أنواع الديودات الضوئية.

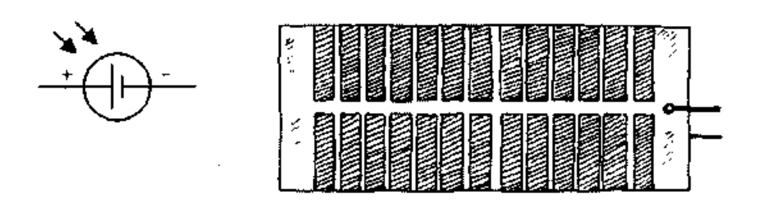
الجدول (5-3): عيِّنة من مواصفات الديودات الضوئية

طول موجة الإصدار الأعظمي النموذجي λp (nm)	زاوية الكشف النموذجية (°)	زمن الصعود (ns) t_r	تبديد الاستطاعة (mw) P_D	تيار الإضاءة الأصغري μA (I_L)	تيار الظلمة الأعظمي (nA) I_D	الجهد العكسي (V) V_R	الوصف	رقم العنصر ورمزه MUFR#
900	65	50	100	35	50	30	ديود أشعة تحت حمراء	NTE 3033

6.5: الخلايا الشمسية

الخلايا الشمسية هي ديودات ضوئية بسطوح كبيرة جداً، والسطح الكبير للخلية الشمسية يجعل الخلية أكثر حساسية للضوء الوارد ويجعلها أكبر قدرة (تيارات وجهود أعلى) من الديودات الضوئية، فمثلاً يمكن لخلية سليكونية واحدة أن تعطي جهداً يساوي (0.5V) بتيار (0.1A) إذ تعرضت لضوء ساطع.

تستخدم الخلايا الشمسية لتغذية الأجهزة الإلكترونية الصغيرة كالآلات الحاسبة الصغيرة، ويمكن وصل الخلايا الشمسية على التسلسل لإعادة شحن بطاريات النيكل-كادميوم. تستخدم الخلايا الشمسية غالباً كعناصر حساسة للضوء في كواشف الضوء المرئي أو القريب من الأشعة تحت الحمراء (في مقاييس الضوء على سبيل المثال وفي دارات القدح المتحسس ضوئياً في الحواكم). للخلية الشمسية، مثل الديود الضوئي، طرف موجب وطرف سالب ويجب مراعاة قطبية الأطراف عند وصل الخلية في دارة فالطرف الموجب يوصل إلى نقطة أكثر إيجابية من النقطة التي يوصل إليها الطرف السالب. يبلغ زمن الاستجابة النموذجي للخلية الشمسية حوالي 20ms.

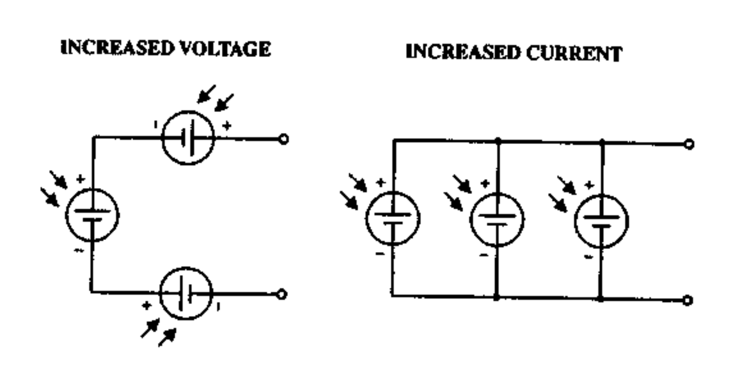


الشكل (5-17): رمز الخلية الشمسية وشكل لوح خلايا شمسية.

1.6.5: التطبيقات الأساسية

مصادر تغذية بالطاقة

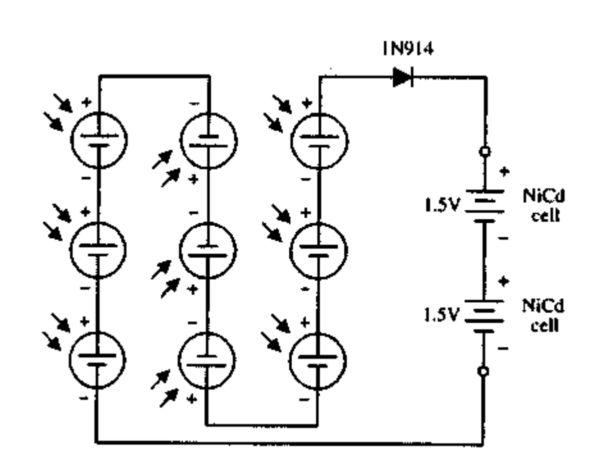
يمكن وصل الخلايا الشمسية (مثل البطاريات) على التسلسل أو على التوازي. تعطي كل خلية شمسية جهداً يتراوح بين (0.45) و(0.5V) إذا كان خرجها مفتوحاً (Open Circuit Voltage) بتيار قد يصل إلى (0.1A) عند تعرضها لضوء ساطع. عند وصل الخلايا على التسلسل يكون الجهد الكلي هو مجموع جهود الخلايا، أما في حالة الوصل التفرعي فالجهد الكلي يساوي جهد خلية واحدة أما التيار الكلي فيساوي مجموع تيارات الخلايا. يبين الشكل (5-18) وصلاً تسلسلياً للخلايا لزيادة الجهد ووصلاً تفرعياً لزيادة التيار.



الشكل (5-18): التطبيقات الأساسية للخلايا الشمسية.

شاحن بطارية

يبين الشكل كيفية وصل تسع خلايا شمسية على التسلسل لشحن بطاريتين من نوع نيكل-كادميوم جهد كل واحدة منهما (1.5V). تؤمن كل خلية (0.5V) والجهد الكلي الذي تؤمنه الخلايا التسعة يساوي (4.5V). يهبط على الديود جهد يساوي تقريبا (0.6V)، ويستخدم الديود في الدارة لمنع بطاريات النيكل كادميوم من التفريغ عبر الخلايا الشمسية خلال وقت الظلام. من الضروري عدم تجاوز معدل الشحن لبطاريات NiCd. توصل مقاومة على التسلسل مع البطاريات من أجل إبطاء (Slow) عملية الشحن.

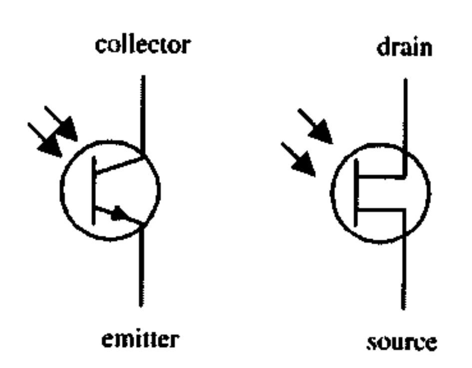


الشكل (5-18): التطبيقات الاساسية للخلايا الشمسية.

7.5: الترانزستورات الضوئية

الترانزستورات الضوئية هي ترانزستورات حساسة للضوء، والنموذج الشائع (العام) للترانزستور الضوئي يشبه الترانزستور ثنائي القطبية ولكن بدون رجل للقاعدة وتستبدل رجل القاعدة بسطح حساس للضوء.

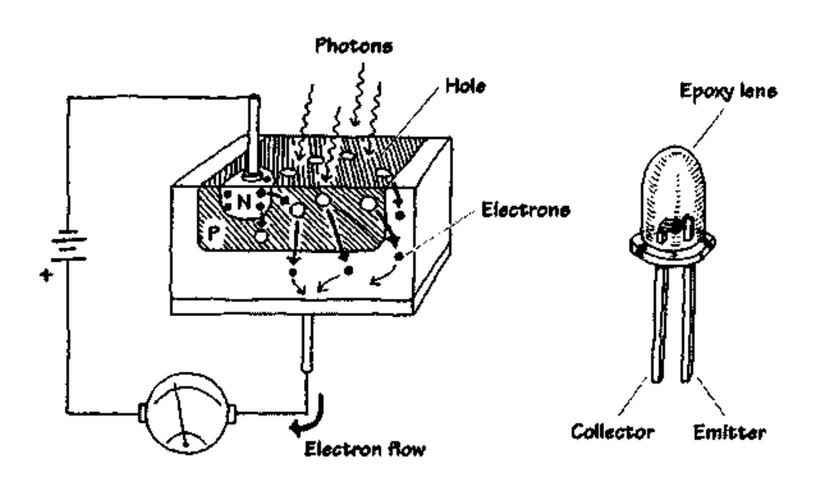
عند وضع هذا السطح في الظلام يكون العنصر في حالة قطع (Off) ولا يمر تيار بين المجمع (Collector) والباعث (emitter) ولكن وعند تعرض السطح الحساس للضوء يمر تيار قاعدة صغير وينتج عن ذلك تيار مجمع أكبر ويمر تيار المجمع الكبير بين المجمع والباعث. توجد أيضاً ترانزستورات حقلية ضوئية (Field Effect Phototransistors) تسمى (PhotoFETs). وبعكس الترانزستورات الضوئية العادية، فإن الضوء في الترانزستورات الحقلية الضوئية يستخدم لتوليد جهد البوابة (gate voltage) الذي يُستخدم للتحكم بتيار المصرف-منبع (drain-source current). الترانزستورات الحقلية الضوئية ذات حساسية عالية جداً للتغيرات الضوئية، ولكن الترانزستورات الضوئية العادية أفضل منها.



الشكل (5-19): رموز الترانزستورات الضوئية.

1.7.5: كيف يعمل الترانزستور الضوئي

يبين الشكل (5-20) بنية ترانزستور ضوئي له طرفان فقط وسنوضح فيما يلي آلية عمل هذا الترانزستور.

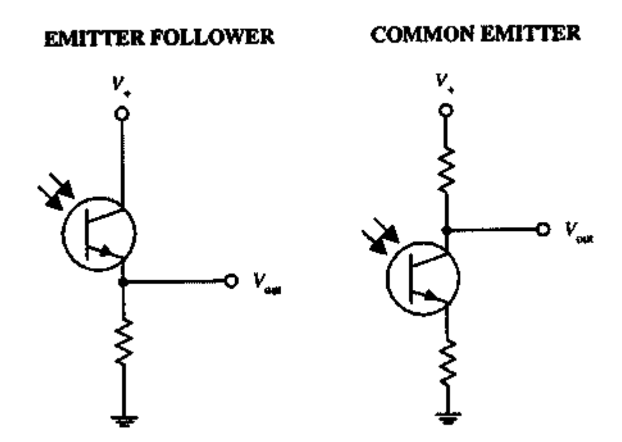


الشكل (5-20): بنية ترانزستور ضوئي وشكله.

يشبه الترانزستور الضوئي ثنائي القطبية (ولكن لا يوجد فيه طرف للقاعدة) الترانزستور ثنائي القطبية العادي ولكن توجد فيه طبقة نوع (p) كبيرة جدا معرضة للضوء. عند تصادم فوتونات الضوء مع إلكترونات المادة (p)، فإن الإلكترونات تكتسب طاقة كافية للقفز فوق الحاجز الكموني للمتصل (pn) وذلك طبعاً إذا كانت الفوتونات ذات تردد وطاقة مناسبين. ونتيجة لقفز الإلكترونات من المنطقة (p) إلى المنطقة (n) تتولد ثقوب في المنقطة (p)، وتنجذب الإلكترونات القافزة إلى الشريحة (n) إلى القطب الموجب للبطارية وتتحرك إلكترونات من سالب البطارية إلى المادة نصف الناقلة العلوية نوع (n) وتعبر المتصل (pn) حيث تلتقي بالثقوب. ونتيجة لذلك يتشكل تيار إلكتروني يتدفق من الباعث إلى المجمع وطبقاً تكون جهة التيار الاصطلاحية من المجمع إلى الباعث وهذا بالضبط ما يحصل عند سقوط الضوء على القاعدة. إذن يمر تيار موجب من المجمع إلى الباعث عند سقوط ضوء على قاعدة الترانزستور الضوئي. توضع المواد نصف الناقلة (pnp) المكونة للترانزستور الضوئي ضمن غلاف يعمل كعدسة مكبرة. يُستخدم غلاف معدني ونافذة مغطاة بالبلاستيك الشفاف في بعض أنواع الترانزستورات الضوئية.

2.7.5: التوصيلات الأساسية

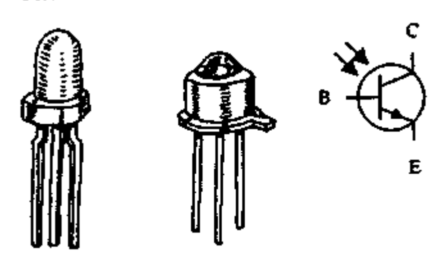
الترانزستور الضوئي يشبه الترانزستور العادي ثنائي القطبية وفي الشكل (5-21) نبين توصيلة تابع الباعث (التي تعطي ربح تيار ولا تعطي ربح جهد) وتوصيلة الباعث المشترك (التي تعطي ربح جهد) لترانزستور ضوئي. نوقشت توصيلات تابع الباعث والباعث المشترك في الفصل الرابع.



الشكل (5-21): التوصيلات الأساسية للترانزستور الضوئي.

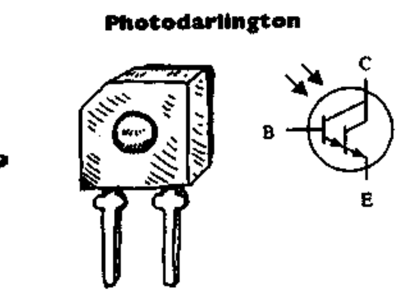
3.7.5: أنواع الترانزستورات الضوئية

ترانزستورات ضوئية بثلاثة أطراف



قد لا تكون الترانزستورات الضوئية التي لها طرفان فقط قادرة على حقن تيار القاعدة الكافي للحصول على تيار مجمع باعث مناسب، ولذلك تستخدم ترانزستورات ضوئية بثلاثة أطراف هي الباعث والمجمع والقاعدة وتستخدم طرفية القاعدة لحقن تيار إضافي يرفع محصلة تيار القاعدة الكلي ويكون تيار القاعدة في هذه الحالة متعلقاً بشدة الضوء وبالتيار الكهربائي الذي يُحقن في القاعدة (بتأثير دارة استقطاب القاعدة كما في الترانزستورات ثنائية القطبية العادية). يمكن استخدام الترانزستورات الضوئية التي لها ثلاثة أطراف في التطبيقات بدلاً من الترانزستورات الضوئية ذات الطرفين على أن يترك طرف القاعدة بدون وصل.

زوج ترانزستورات دارلنغتون الضوئي



هذا الترانزستور يشابه زوج ترانزستورات دارلنغتون ثنائي القطبية العادي ولكنه حساس للضوء ويعتبر هذا الترانزستور أكثر حساسية للضوء من الترانزستورات الضوئية العادية ولكن زمن استجابته كبير (بطيء الاستجابة). تتوفر هذه الترانزستورات برجل قاعدة أو بدونها.

الشكل (5-22): أنواع الترانزستورات الضوئية.

4.7.5: معلومات فنية

للترانزستورات الضوئية، كما هي الحال في الترانزستورات العادية، جهد انهيار أعظمي ومعدلات جهد وتيار واستطاعة تبديد. يتعلق تيار المجمع (Ic) في الترانزستور الضوئي بشكل مباشر بكثافة الإشعاع الساقط على قاعدة الترانزستور وبمقدار ربح التيار المستمر (dc current gain) وبتيار القاعدة الخارجي (في الترانزستورات التي لها ثلاثة أطراف). عند استخدام الترانزستور الضوئي للتحكم بالتيار المار بين المجمع والباعث، يمر تيار صغير تسربين يسمى تيار الظلمة (dark current ID) عبر العنصر حتى عندما يكون العنصر موضوعاً في الظلام. هذا التيار يكون عادة غير هام (من مرتبة nA). يعرض الجدول (4-5) جزءاً من نشرة معطيات نموذجية للترانزستورات الضوئية.

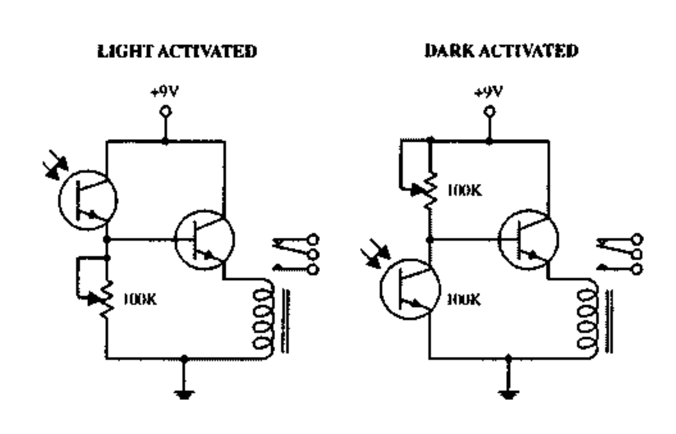
الجدول (4-5): جدول مواصفات ترانزستورات ضوئية.

زمن الاستجابة النموذجي (µs)	استطاعة التبديد الأعظمية (mw) P_D	تيار الإضاءة الأصغري mA (I_C)	تيار المجمع الأعظمي (nA) I_D	تيار المجمع الأعظمي (mA) I_C	الجهد بين القاعدة والمجمع (V) BV_{CBO}	الوصف	رمز العنصر ورقمه MNFR#
6	150	1	100 عند $V_{CE} = 10V$	40	30 (V_{CEO})	npn ترانزستور ضوئي للضوء المرئي والـ IR	NTE3031
151	250	12	100	250	50	npn ترانزستور دارلنغتون ضوئي سيلكوني للضوء المرئي والـ IR	NTE3036

5.7.5: تطبيقات

حاكمة تفعل ضوئيا

يستخدم ترانزستور ضوئي في هذه الدارات للتحكم بتيار قاعدة ترانزستور عادي مستخدم لقيادة حاكمة. في الدارة اليسارية التي تفعل عند سقوط الضوء عليها ينتقل الترانزستور الضوئي إلى حالة (On) عند سقوط ضوء عليه ويمر بذلك تيار من مصدر التغذية إلى قاعدة الترانزستور العادي المستخدم كمفتاح قيادة حاكمة فينتقل الترانزستور العادي إلى حالة (On) ويمر تيار عبر ملف الحاكمة وتفعل الحاكمة. في الدارة اليمينية التي تفعل في الظلمة يتم العمل بنفس المبدأ ولكن بالعكس، فعند منع الضوء من السقوط على قاعدة الترانزستور الضوئي ينتقل هذا إلى حالة (Off) ويمر تيار عبر المقاومة المتغيرة (100kΩ) إلى قاعدة الترانزستور العادي فينتقل إلى حالة (On) وتفعل الحاكمة، أما



الشكل (5-23): بعض تطبيقات الترانزستورات الضوئية.

عند وجود ضوء فإن قدراً كبيراً من التيار الوارد عبر المقاومة 100kΩ يمر عبر الترانزستور الضوئي إلى الأرض ولا يمر تيار كاف في قاعدة الترانزستور العادي ولا يعمل وتبقى الحاكمة في حالة راحة. تستخدم المقاومات المتغيرة 100kΩ في الدارتين لضبط حساسية الدارتين عن طريق التحكم بالتيار الذي يمر في قواعد الترانزستورات العادية.

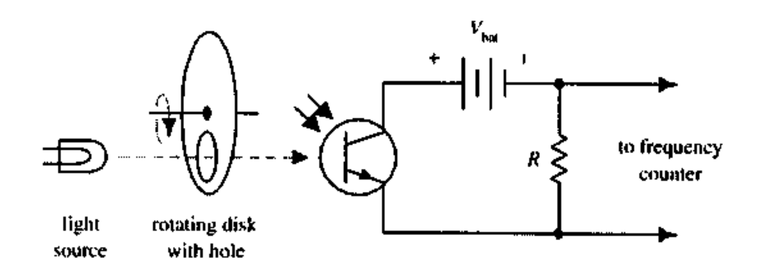
دارة مستقبل

Receiver Circuit

يستخدم في هذه الدارة ترانزستور ضوئي ككاشف موجة ضوئية معدلة مع دارة مضخم (مضخم تيار). تستخدم المقاومات (R2) و(R3) من أجل تأمين نقطة عمل الترانزستور الاستطاعي العادي (Power Transistor). أما المقاومة R1 فتستخدم لضبط حساسية الترانزستور الضوئي. يعمل المكثف على حجز الإشارات المستمرة ومنعها من دخول مرحلة المضخم.

مقياس سرعة دوران

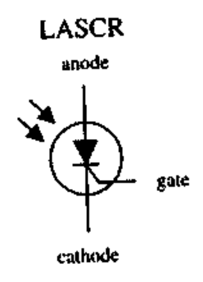
يبين هذا الشكل كيفية استخدام ترانزستور ضوئي كعداد بسيط أو كمقياس سرعة دوران. يستخدم في الشكل قرص دوّار فيه ثقب يسمح بمرور الضوء عبره مرة واحدة كل دورة. يؤدي الضوء المار عبر الثقب إلى قدح الترانزستور الضوئي ونقله إلى حالة تمرير، ويستخدم عداد تردد لعد (Count) النبضات الكهربائية المولدة.



تابع الشكل (5-23): بعض تطبيقات الترانزستورات الضوئية.

8.5: الثايرستور الضوئي

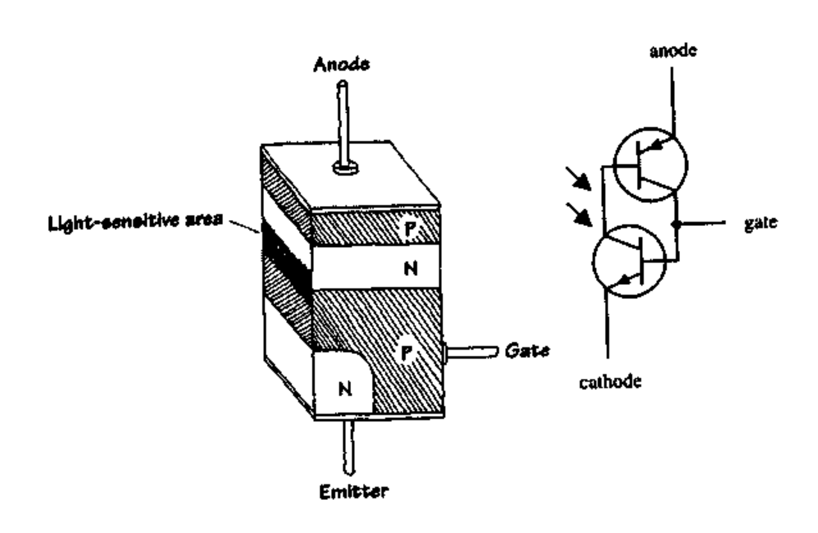
الثايرستورات الضوئية هي ثايرستورات تُفعل ضوئياً، والثايرستورات الضوئية شائعة الاستخدام هي الثايرستورات المفعلة ضوئياً (LASCR)، والترياكات المفعلة ضوئياً (Light activiated Triacs). يعمل الثايرستور المفعل ضوئياً كمفتاح يغير حالته بمجرد سقوط نبضة ضوئية عليه ويبقى الثايرستور الضوئي في حالة تمرير حتى إذا حجبت النبضة الضوئية عنه ويستمر كذلك حتى تنعكس قطبيات جهود المصعد والمهبط أو حتى تفصل تغذية الثايرستور بالكامل. الترياك المفعل ضوئياً يشبه الثايرستور المفعل ضوئياً ولكنه مصمم للتعامل مع التيارات المتناوبة. يبين الشكل (5-24) رمز الثايرستور الضوئي.



الشكل (5-24): رمز الثايرستور الضوئي.

5.8.1: كيف يعمل الثايرستور الضوئي

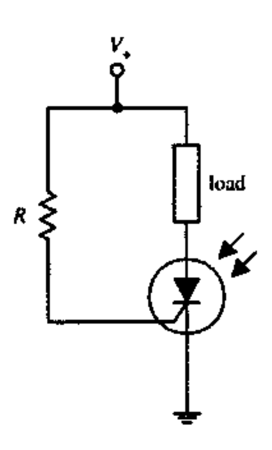
تسهل الدارة الترانزستوية المكافئة للثايرستور الضوئي والمبينة في الشكل (5-25) شرح آلية عمل الثايرستور الضوئي. هنا، وكما في العناصر الإلكترونية الضوئية، وعند مرور فوتون عبر الجانب (p) للمتصل (pn) فإن هذا الفوتون يصطدم مع إلكترون في المنطقة (p) فيكتسب الإلكترون طاقة تحرره من رابطته ويقفز عبر المتصل إلى المنطقة (n). عندما يقوم عدد من الفوتونات بتحرير عدد من إلكترونات المنطقة (p) وتقفز هذه الإلكترونات عبر المتصل إلى المنطقة (n) يتولد تيار قاعدة كبير وكاف لنقل الترانزستور إلى حالة (On). عند حجب الضوء عن الثايرستور يبقى الثايرستور في حالة عمل حتى تنعكس قطبيات مصعده ومهبطه أو تُفصل عنه التغذية. وهذا ينتج من حقيقة أن قواعد الترانزستورات تمر بها تيارات المصعد والمهبط.



الشكل (5-25): دارة ترانزستورية مكافئة للثايرستور الضوئي وبنية الثايرستور الضوئي.

5.8.2: دارة أساسية بسيطة

تبين دارة الشكل (5-26) ثايرستوراً ضوئياً مستخدماً كمفتاح للتحكم بمرور تيار عبر حمل (Load). في حال عدم وجود ضوء مسلط على الثايرستور يكون الثايرستور في حالة قطع ولا يمر تيار عبر الحمل. عند إضاءة الثايرستور الضوئي LASCR ينتقل إلى حالة (On) ويمر تيار عبره وعبر الحمل. تستخدم المقاومة R الموجودة في الدارة لضبط مستوى قدح الثايرستور الضوئي.



الشكل (5-26): دارة بسيطة لثايرستور ضوئي.

9.5: العوازل الضوئية

العوازل الضوئية (Optoisolators) أو عناصر الربط الضوئي (Optocouplers) هي عناصر توصل دارتين مع بعضهما باستخدام الضوء، فعلى سبيل المثال يمكن أن يتكون العازل الضوئي من ديود مصدر للضوء (LED) ومن ترانزستور ضوئي موضوعين في غلاف كتيم بالنسبة للضوء. يوصَل الديود المصدر للضوء LED في العازل الضوئي مع دارة المصدر (Source Circuit). عندما يمر تيار في الديود المصدر للضوء تنطلق منه فوتونات يلتقطها الترانزستور الضوئي. توجد أنواع عديدة من تشكيلات حساسات المصدر (Source Sensors) مثل ديود مصدر للضوء LED- ديود ضوئي، ديود مصدر للضوء LED- ثايرستور ضوئي LASCR، ومصباح -ترانزستور ضوئي.

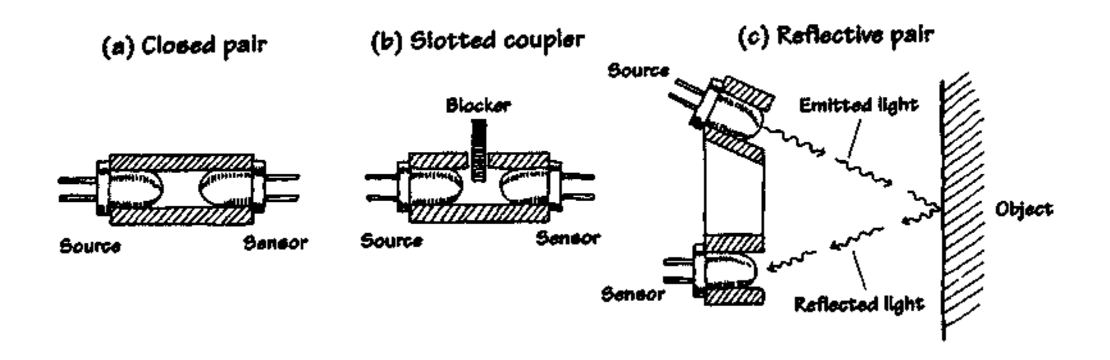
تستخدم العوازل الضوئية لضمان العزل الكهربائي بين الدارات. ويعني هذا أنه يمكن استخدام دارة للتحكم بدارة أخرى دون حدوث تغيرات غير مرغوبة في الجهود والتيارات والتي يمكن أن تنشأ فيما لو كانت الدارتان موصولتين مع بعضهما.

تغلف العوازل الضوئية ضمن غلاف كتيم للضوء ويتقابل الوجهان المصدر للضوء والحساس للضوء من مصدر الضوء وكاشفه، وفي هذه الحالة يسمى العازل الضوئي باسم زوج مغلق (Closed pair)، انظر الشكل (5-27). تستخدم الأزواج المعزولة، إلى جانب استخدامها في تطبيقات العزل الكهربائي، في تحويلات المستوى (Level Conversions) وكحواكم صلبة (Solid State Relays). يوجد رابط ضوئي مزود بشق يسمى (Slotted Coupler) أو مقطِّع (Interrupter) وهو عبارة عن عنصر ربط ضوئي مزود بشق بين المصدر الضوئي والحساس الضوئي، ويمكن وضع حاجز (blocker) في هذا الشق من أجل تقطيع الإشارات الضوئية (انظر الشكل 5-27). تستخدم هذه العناصر عادة من أجل كشف الأجسام، وكذلك لكشف الاهتزاز وكمفاتيح عديمة الارتداد (bounce free switch).

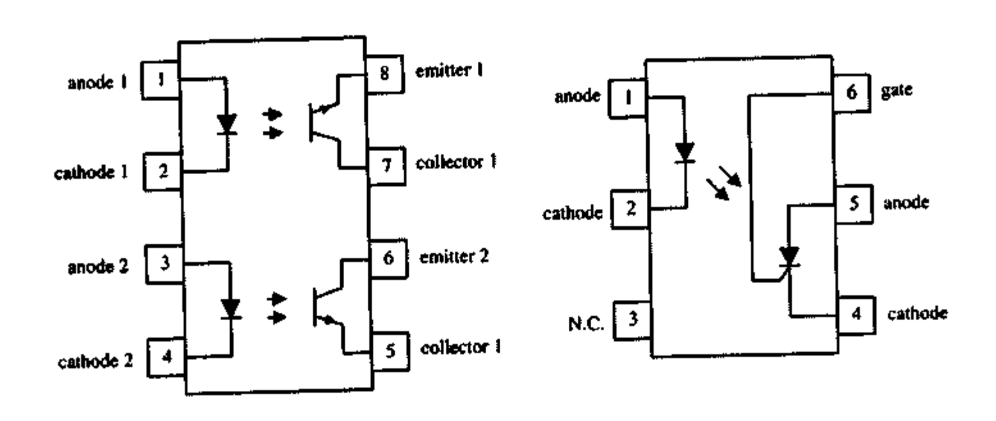
هناك نوع آخر من عناصر الربط الضوئي هو الزوج الانعكاسي (reflective pair) ويوجد فيه مصدر للضوء وكاشف لالتقاط ضوء المصدر بعد انعكاسه عن جسم. تستخدم الأزواج الانعكاسية لكشف الأجسام وكعناصر لمراقبة الانعكاس (reflectance monitors)، وفي مقاييس سرعة الدوران وفي كواشف الحركة (movement detectors).

1.9.5: العوازل الضوئية المتكاملة

تتوفر العوازل الضوئية المسماة أزواج مغلقة كدارات متكاملة (ICs)ويبين الشكل (5-28) دارتين متكاملتين فيهما عوازل ضوئية.



الشكل (5-27): بعض أنواع الروابط (العوازل) الضوئية.

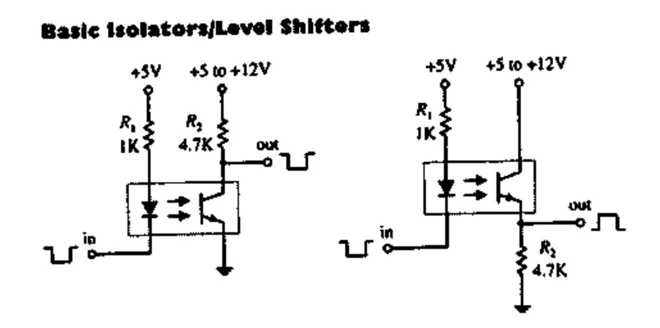


الشكل (5-28): دارات متكاملة لعوازل ضوئية.

2.9.5: تطبيقات

مزيحات مستوى/عوازل اساسية

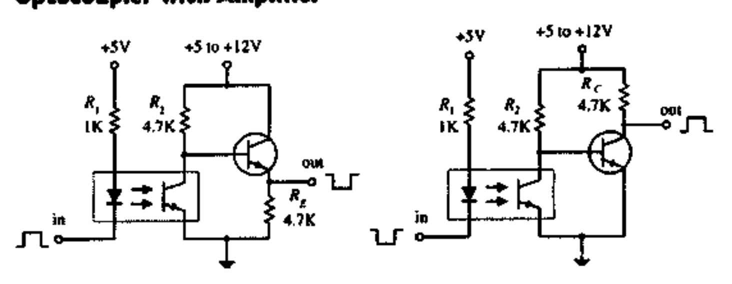
يستخدم في هذه الدارات عازل ضوئي مكون من ديود مصدر للضوء ومن ترانزستور ضوئي لتأمين عزل كهربائي بين دارة المصدر ودارة الحساس، بالإضافة إلى تأمين إزاحة بمستوى الجهد المستمر في الخرج. في الدارة اليسارية لاحظ أن الخرج غير معكوس، أما في الدارة اليمينية فالخرج معكوس.



الشكل (5-29): عناصر ربط ضوئي مع مضخمات.

رابط ضوئي مع مضخم

في التطبيقات الكهروضوئية قد لا يكون الترانزستور الضوئي الموجود في دارة العازل الضوئي قادراً على تأمين القدرة الكافية لتشغيل الدارات اللاحقة. تبين الدارة المعطاة في الشكل كيفية استخدام مضخمات لحل هذه المشكلة، وطبعاً الترانزستورات المستخدمة في هذه المضخمات هي ترانزستورات عادية وتسمى أحياناً ترانزستور وصل وفصل استطاعية (Power switching transistors).



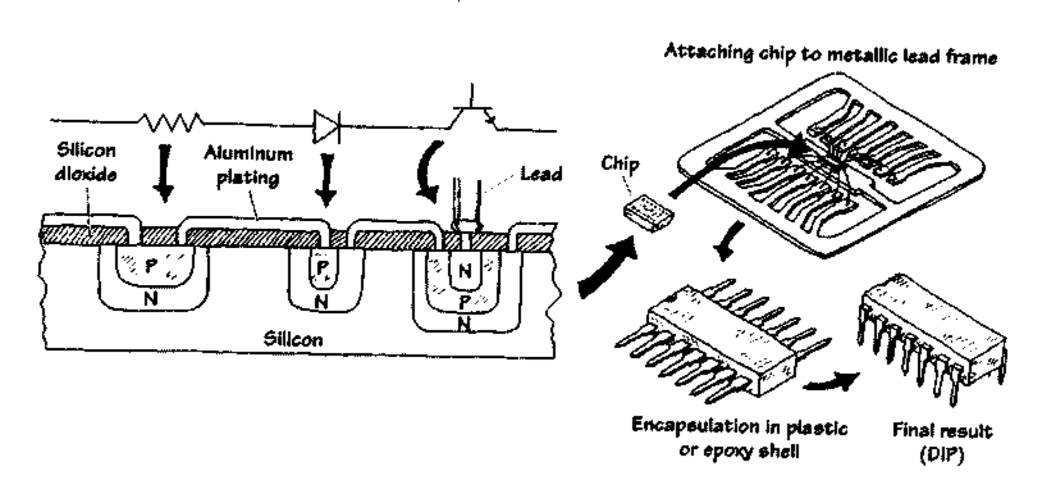
تابع الشكل (5-29): عناصر ربط ضوئي مع مضخمات.

6



الدارات المتكاملة

الدارة المتكاملة (Integrated Circuit) هي دارة مصغرة تحوي عدداً من المقاومات، والمكثفات، والديودات، والترانزستورات الموصولة مع بعضها على شريحة سيليكونية واحدة ليست أكبر من ظفر الإصبع. يتراوح عدد المقاومات والمكثفات والترنزستورات في دارة متكاملة من بضعة عناصر إلى مئات الآلاف. والسر في حشر هذا العدد الهائل من العناصر على شريحة صغيرة هو تكوين كافة العناصر من تراكيب نوع (n) ونوع (p) بالغة الصغر على شريحة السيلكون الواحدة بخطوات تصنيع مختلفة. من أجل وصل هذه العناصر مع بعضها لتكوين الدارة المطلوبة تستخدم طرق تكنولوجية خاصة يتم فيها ترسيب المعدن الناقل المستخدم للوصل ضمن حفر مصنوعة بطريقة الحفر الضوئي كما يتم وصل أطراف العناصر إلى العالم الخارجي بواسطة أرجل تظهر من غلاف الدارة المتكاملة. يبين الشكل (6-1) مقطعاً مكبراً في دارة متكاملة (IC) ويوضح هذا الشكل توضع العناصر والوصل الكهربائي البيني.



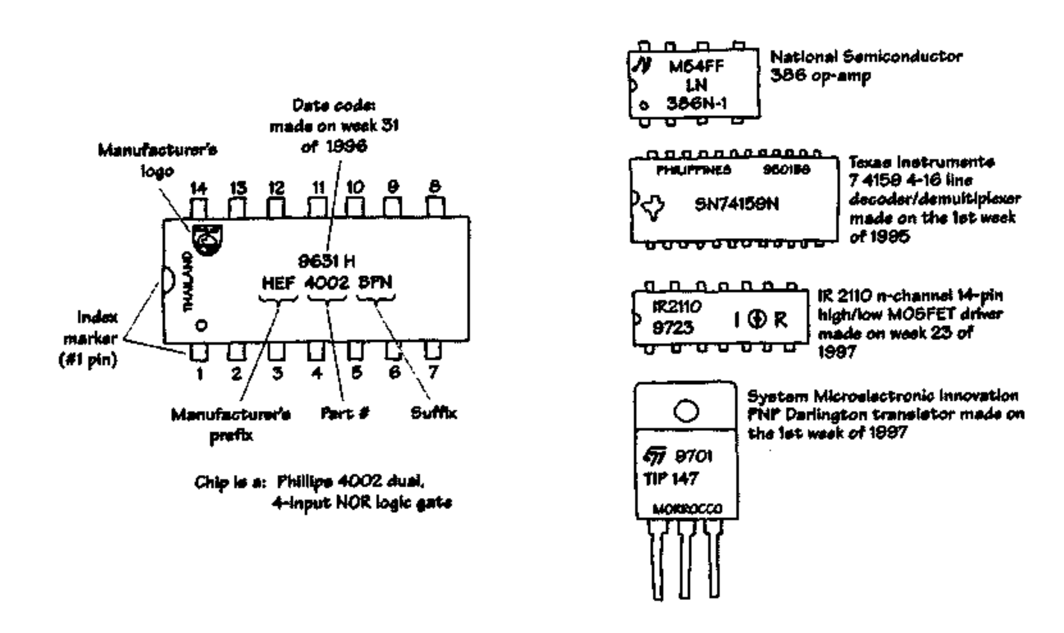
الشكل (6-1): مقطع مكبر في دارة متكاملة وأشكال بعض الدارات المتكاملة.

تتوفر الدارات المتكاملة بأنواع مختلفة منها التشابهية (analog) ومنها الرقمية digital. تستخدم الدارات المتكاملة التشابهية والتي تسمى أيضاً خطية (linear) في التضخيم، أما الدارات المتكاملة الرقمية فتتعامل مع إشارات ذات مستويات جهود إما عالية (high) أو منخفضة (low)، أما الدارات المتكاملة المختلطة التشابهية/الرقمية فتتشارك بصفات مشتركة بين الدارات المتكاملة الرقمية والمتكاملة التشابهية. تعتبر المضخمات العملياتية ومنظمات الجهد (voltage regulators) والمقارنات

(Comparators) والمؤقتات (Timers)، والهزازات (Oscillators) نماذج وأمثلة عن الدارات المتكاملة التشابهية. أما الدارات المتكاملة الرقمية الشائعة فتتضمن البوابات (مثل AND، OR، NOR... الخ)، والقلابات (Flip-Flops)، والذواكر (memories)، والمعالجات (Processors)، والعدادات الثنائية (Binary Counters)، ومسجلات الإزاحة (Shift registers)، والمرمزات (encoders) وفاكات الترميز (decoders) والنواخب (multiplexers)، وغيرها. الدارات المتكاملة الرقمية/التشابهية يمكن أن تأخذ أشكالاً مختلفة فيمكن مثلاً أن تصمم كمؤقت تشابهي (analog timer) ولكنها قد تحوي عداداً رقمياً (digital counter). يمكن للدارة المتكاملة الرقمية التشابهية أيضاً أن تقرأ إشارة رقمية وتولد خرجاً خطياً يُستخدم لقيادة محرك خطوة مثلاً أو لقيادة إظهار بواسطة ديودات مصدرة للضوء.

1.6: أغلفة الدارات التكاملية

توضع الدارات المتكاملة على الأغلب في أغلفة ذات صفين متناظرين من الأرجل dual in-Line Packages (DIPs)، ويتكون هذا النوع من الأغلفة من صندوق بلاستيكي أو سيراميكي وتخرج من طرفيه أرجل معدنية، ولكل رجل من هذه الأرجل وظيفة محددة ولها رقم محدد، وتكون الرجل (1) دوماً إلى يسار علام بداية عد الأرجل، انظر الشكل (6-2) وتأخذ الأرجل التالية أرقاماً تسلسلية متصاعدة باتجاه عكس عقارب الساعة. يُطبع على غلاف الدارة المتكاملة رمز الشركة الصانعة، وبعض الأحرف البادئة التي تخص الشركة ثم رقم الدارة المتكاملة تليه لاحقة (Suffix)، بالإضافة إلى ترميز للتاريخ. باقي الأرقام والرموز التي توجد على غلاف الدارة المتكاملة IC تستخدم من أجل تحديد مجال درجة الحرارة ونوع الغلاف وغيرها. وفي الشكل (6-2) نبين بعض أشكال أغلفة الدارات المتكاملة مع شرح للرموز والكتابات والدلالات الموجودة عليها.



الشكل (6-2): أشكال أغلفة بعض الدارات المتكاملة.

من الملاحظ أن بعض أنظمة الكتابة على الدارات المتكاملة تستخدم الشكل التالي "XX44C55P-1" وفي هذه الكتابة تمثل الخانات "XX" سابقة تخص الجهة المنتجة، أما "44" فتمثل شيفرة عائلة الشريحة، أما الرمز "C" فيمثل عملية التصنيع (فمثلاً C = CMOS، F = Fast، hc = high Speed CMOS وتعني عائلة CMOS عالية السرعة،

LS = Power Schottky ،TTL عالي السرعة متآلف مع CMOS وتعني hct = high speed CMOS TTL Compatible وتعني عائلة شوتكي الاستطاعية، إلخ). الأحرف "PP" عبارة عن لاحقة تمثل شيفرة نوع الغلاف وهي خاصة فقط بالجهة الصانعة، أما الرقم "1" فيمثل سرعة الدارة المتكاملة. يبين الجدول (6-1) قائمة جزئية بسوابق بعض الشركات (الأحرف والرموز الأولى التي تسبق رقم الدارة المتكاملة)، ومن الجدير بالذكر أن السوابق قد لا تكون دوماً مناسبة لتحديد الجهة الصانعة للدارة المتكاملة، لأن عدة شركات قد تستخدم نفس السابقة فمثلاً الحرف "P" يستخدم من قبل الشركات ASD، هاريس Haris، هيوليت باكارد Hewlett-Packard، أنتيل Intel، ميتسوبيشي، موتورولا، NEC، وفيليبس وSGS وTemic. إذا لم تكن متأكداً من الشركة الصانعة من خلال الأحرف التي تسبق رقم الدارة وكنت تريد بالضرورة معرفة الجهة الصانعة عليك النظر إلى رمز الشركة أو شعارها الصانعة والذي قد يكون موجوداً على الدارة المتكاملة.

الجدول (6-1): لائحة جزئية بأسماء الشركات الصانعة والسوابق Prefixes الخاصة بها.

الجهة الصانعة	السابقة	الجهة الصانعة	السابقة
Allegro	A, µPA, UCX	Siliconix	L, LD
Analog Devices	AD	Linear Technology	LT
Advanced Micro Devices	Am, A, AO	Mitsubishi	M
Panasonic	An	Fugitsu	MB, FTU
General Instrument	AY, GIC, GP, GI, FE, GF, W, GI	MOS Technology	MCS
Sony	Bx, Cx, GI	Microsystems International	MIL
Intel	B, C, I, M, IR, A, AP, AT	Mostek	MK
RCA (now Harris)	CA, CD, CDP	Plessey	MN, SL, SP
TRW	CA, TDC, MPY, CMP, DAC, MAT, OP	Signetics	N, NE, S, SE, SP
Precision Monolithics	PM, REF, SSS	Next	Nx
National Semiconductor	DM, LF, LFT, LH, LM, NH, NA, NDx	NTE	NTE
Sanyo	DSK	Precision Monolithics	PM
Fairchild (now National Semiconductor)	F µA, µL, Unx	Quality Semiconductor	QS
Ferranti	FSS, ZLD, Zn	Raytheon	R, RAY,RC, RM
GE	GEL	Silicon General	SG
Harris	HA	Shanghai Belling Micro	SGS
Hitachi	HA, HD, HG, HI, HZ	Siemens	B, BB, BF
Motorola	HEP, M, MC, MCC, MCM, MFC, MM, MWM, HEF, HEED, T, CH, J	Texas Instruments	SN, TL, TMS, TEX
Intersil	ICH, ICL, ICM, IM	Toshiba	T, TC, HZ, M, TA, TH, JT
IR	IR, IRB, IRxx	Sprague	ULN, ULS

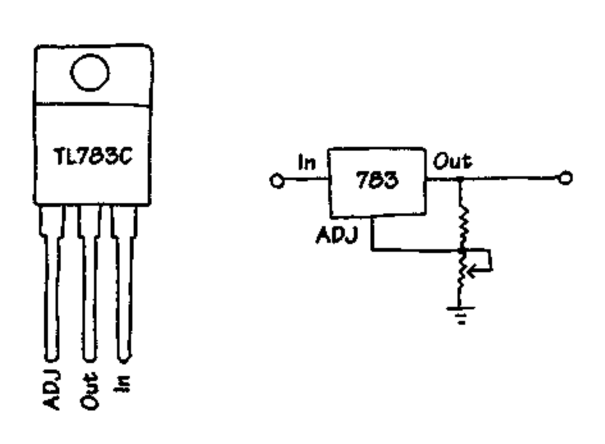
السابقة	الجهة الصانعة	السابقة	الجهة الصانعة
µP, µTD, NRA, NRB, NRx	NEC	IR	Sharp
WC, WM	Westinghouse	ITT, MIC	ITT
XR	Exar	HEF, HCF, M, AD, AJ, J, B, BB, BA, ON, OT	Philips
YAC, YM, YMF, YSS	Yamaha	KA, IR, K Kxx	Samsung
5082-nnnn, AT	Hewlett-Packard		

هناك مشكلة أخرى عند شرح الكتابات والرموز الموجودة على الدارات المتكاملة وهي تحديد معنى اللواحق (Suffixes) حيث توضع اللواحق بعد رقم الدارة المتكاملة وتدل اللواحق على نوع غلاف الدارة المتكاملة (مثلاً غلاف سيراميكي بصفين متناظرين من الأرجل، أو بلاستيكي بصفين متناظرين من الأرجل)، أو لتبيان مجال درجات حرارة العمل. والشيء المحبط بخصوص اللواحق هي عدم وجود معيار موحد مستخدم، ويمكن أن تكون اللواحق ذات معنى خاص ويتغير حسب الشركة الصانعة. يمكن الحصول على قائمة كاملة وحديثة بالسوابق (Prefixes) الخاصة بالشركات الصانعة من شبكة الإنترنت (www.hitex.com/chipdir/index.htm)، وإذا لم تتمكن من الدخول إلى هذه الصفحة ابحث عن "chip Directory" ضمن الشبكة فتحصل على مواقع يمكن أن تجد فيها الشيء المطلوب ويمكن أن تحصل في دليل الدارات التكاملية (chip Directory) على رموز الشركات الصانعة (Company logos)، وعلى اختصارات الشركات، ومعاني اللواحق، وعلى الدارات المتكاملة حسب أرقامها، أو حسب أسمائها، أو حسب عوائلها بالإضافة إلى روابط لمواقع الشركات الصانعة.

2.6: بعض الدارات المتكاملة الأساسية

منظم جهد قابل للضبط ثلاثي الأطراف TL783

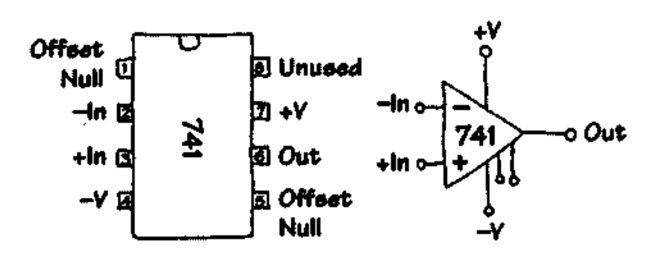
يُستخدم هذا العنصر كمنظم جهد قابل للضبط في تطبيقات الجهود العالية، ويمكن ضبط جهد الخرج بين (1.25V و125V) بتيار خرج أعظمي 700mA. نحتاج إلى مقاومتين خارجيتين من أجل ضبط جهد الخرج. ستغطى منظمات الجهد بتفصيل أكبر في الفصل العاشر.



الشكل (6-3): شكل منظم الجهد TL783C ودارته.

المضخم العملياتي 741CD

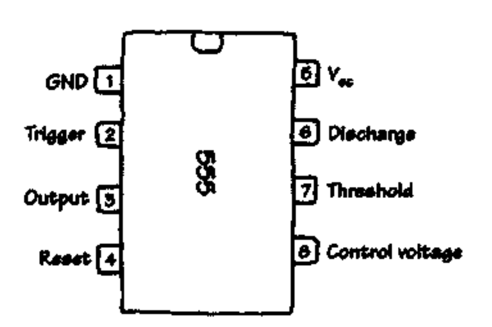
المضخم العملياتي (741) هو أكثر أنواع المضخمات العملياتية استخداماً ويمتاز بأداء عال وهو عبارة عن دارة متكاملة خطية. يمكن استخدام هذا المضخم العملياتي في تشكيل دارات مختلفة منها المضخم العاكس، المضخم غير العاكس، هزاز، مكامل، مفاضل، دارة جمع، طارح وغيرها وفي كل هذه التطبيقات لابد من وجود تغذية عكسية توصل بين الخرج والمدخل غير العاكس. يمكن أن يتم وصل مقاومة بين الخرج والمدخل غير العاكس لتشكيل التغذية العكسية كما في تطبيقات المضخم العاكس وغير العاكس ودارة الجمع والطرح والمفاضل. في حال عدم استخدام التغذية العكسية يمكن أن يعمل المضخم (741) كمقارن. يُصنع المضخم العملياتي (741) من جهات عديدة. للتعرف على المزيد من المعلومات عن المضخمات العملياتية ننصح بمراجعة الفصل السابع.



الشكل (6-4): شكل الدارة المتكاملة لمضخم 741 ورمزه.

المؤقت 555

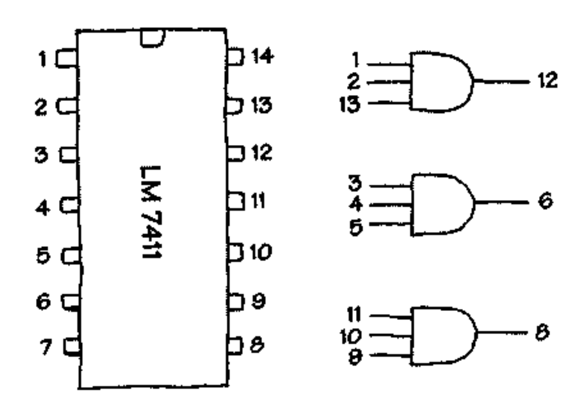
دارة المؤقت 555 هي دارة متكاملة متعددة الاستخدامات، ويمكن استخدامها لتشكيل هزازات نبضية عديمة الاستقرار، أو وحيدة الاستقرار وذلك بوصل مقاومات ومكثفات بين أرجل الدارة وجهد التغذية والأرضي. يمكن مثلاً استخدام مولد النبضات عديم الاستقرار للتحكم بفتح مفتاح وإغلاقه وفق معدل معين. تستخدم دارة الـ 555 أيضاً كدارة مؤقت، أو كمولد نبضات Clock، أو كمولد نغمات. يُدرس المؤقت 555 بالتفصيل في الفصل الثامن.



الشكل (6-5): شكل الدارة المتكاملة لمؤقت 555.

بوابات AND ثلاثية المداخل LM7411

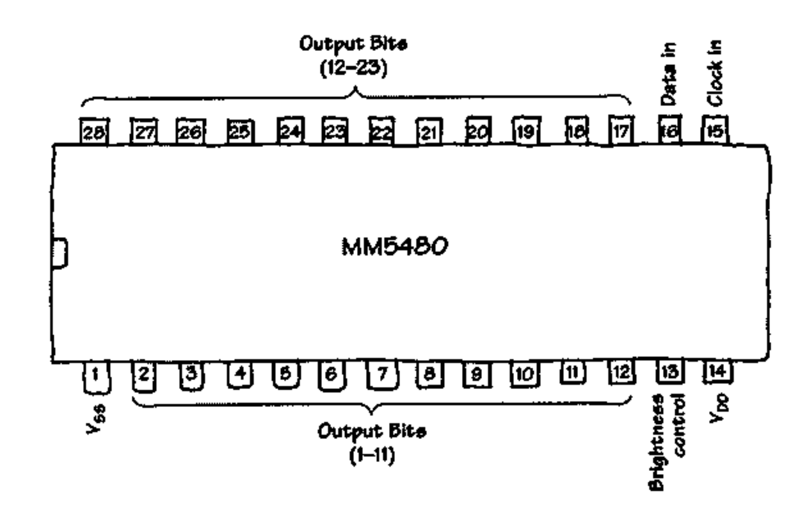
تحوي الدارة المتكاملة LM7411 بداخلها على ثلاث بوابات AND ولكل بوابة ثلاثة مداخل وخرج واحد. تغذى كافة هذه البوابات من رجل الدارة المتكاملة رقم (14). سندرس في الفصل الثاني عشر بوابات NAND، وOR وNOR والذواكر والمعالجات الصغرية والمتحكمات الصغريَّة (microcontrollers) وغيرها من الدارات المتكاملة المنطقية (Logic ICs).



الشكل (6-6): شكل الدارة المتكاملة LM7411 ورموز بوابات AND ثلاثية المداخل.

دارة قيادة إظهار بديودات مصدرة للضوء MM5480

هذه الدارة المتكاملة مصممة لقيادة وحدات إظهار LED ذات مصعد مشترك ومهابط منفصلة. يمكن لرجل منفردة أن تتحكم بسطوع إضاءة LED عن طريق وصل الرجل عبر مقاومة متغيرة إلى مصدر تغذية. من مواصفات هذه الدارة التحكم الدائم بسطوع الإضاءة، دخل معطيات تسلسلي، تآلف مع عائلة TTL، هذا بالإضافة إلى إمكانية العمل ضمن مجال واسع من جهد التغذية المستمر، وإمكانية قيادة إظهار بعدد خانات (3 1/2 digit). يمكن استخدام الدارة MM5480 مع مبينات التحكم الصناعي، وفي الساعات الرقمية digital clocks، وفي مقاييس الحرارة وفي مقاييس الجهد. سوف تناقش دارات قيادة الإظهار LED في الفصل الثاني عشر.



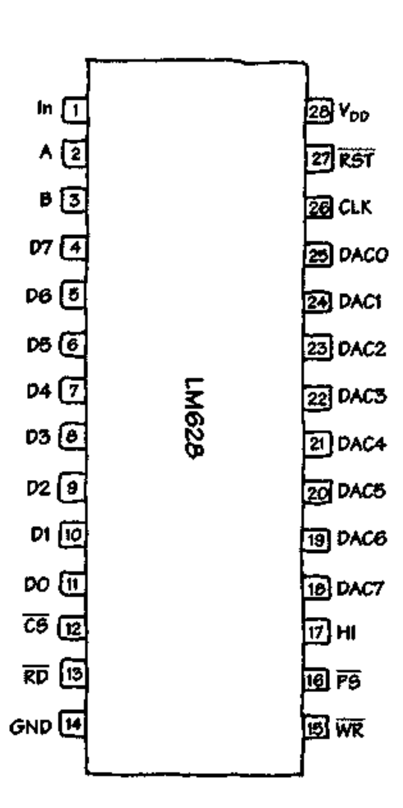
الشكل (6-7): شكل الدارة المتكاملة MM5480.

متحكم دقيق بالحركة LM628

الدارة المتكاملة LM628 هي عبارة عن معالج للتحكم بالحركة (motion-control processor)، يستخدم إشارة تغذية عكسية موضعية (ذات علاقة بالموضع Position) تزايدية ترابعية من محركات التيار المستمر، ومن محركات السيرفو dc عديمة التماسات (brushless)، ومن آليات سيرفو أخرى. للدارة خرج 8-bit يمكن أن يقود مبدل رقمي إلى تشابهي DAC بثماني خانات أو (12) خانة، ويمكن استخدام المبدل لبناء نظام سيرفو (Servo System) يتضمن محرك تيار مستمر ومفعلاً

actuator ومرمزاً تزايدياً (incremental encoder) ومبدل رقمي تشاهي DAC بالإضافة إلى مضخم استطاعة (Power amplifier). نورد فيما يلي بعض مواصفات هذه الدارة المتكاملة:

- موضع 32 bit.
- مسجلات تسارع وسرعة.
- أنماط عمل للسرعة والموضع.
- مقاطعة قابلة للبرمجة في الزمن الحقيقي.
- دارة ربط غير متزامنة تفرعية 8bit.
- مرمز تزايدي ترابعي.



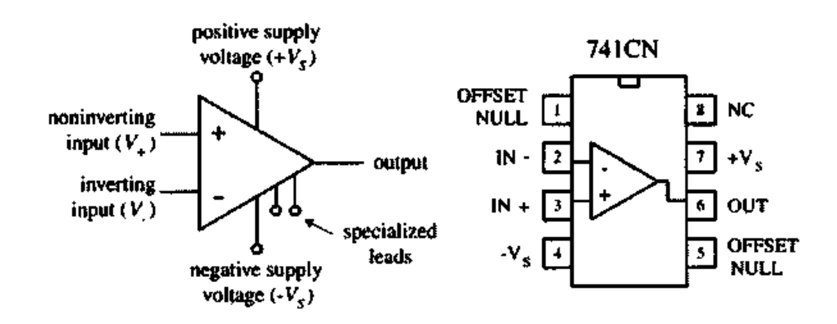
الشكل (6-8): شكل الدارة المتكاملة LM628.



7

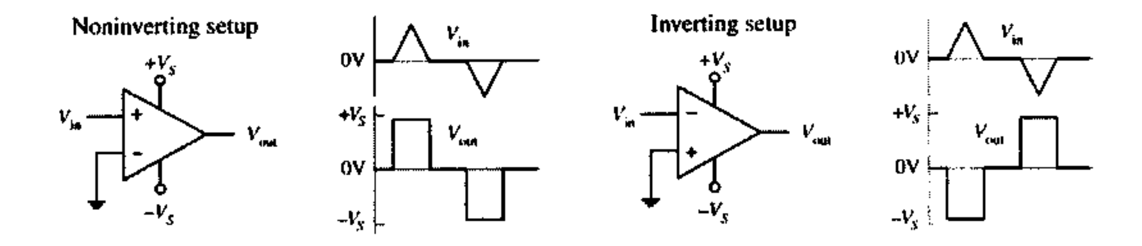
المضخمات العملياتية

المضخمات العملياتية (Op amps) هي عبارة عن مضخمات مفيدة جداً ويمكن استخدامها في عدد كبير جداً من التطبيقات وبطرق مختلفة. المضخم العملياتي النموذجي هو دارة متكاملة بمدخل غير عاكس (noninverting input)، ومدخل عاكس (inverting input) وخرج (Output) وطرفين لوصل جهد التغذية (موجب وسالب) وبعض الأرجل الأخرى ذات الاستخدامات الخاصة. تحذف خطوط وصل التغذية وخطوط الأرجل الخاصة عند رسم مخططات الدارات، وإذا وجدت في مخطط ما مضخماً عملياتياً بدون خطوط تغذية فعليك أن تتذكر أنه يغذى من مصدرين (dc) أحدهما موجب والآخر سالب وأن هذه المصادر غير مبينة على المخطط للتبسيط فقط. يبين الشكل (7-1) رمز المضخم العملياتي وشكل الدارة المتكاملة 741CN مع أرقام وتسميات أرجل المضخم العملياتي الموجود ضمنها.



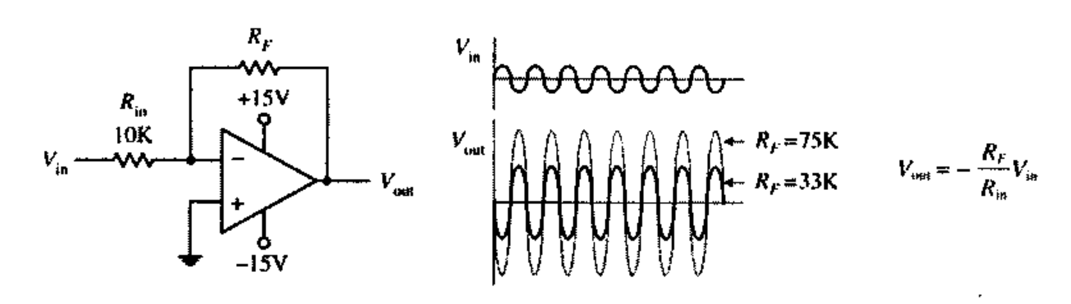
الشكل (7-1): رمز المضخم العملياتي والدارة المتكاملة 741CN.

إن مبدأ عمل المضخم العملياتي بسيط جداً، فإذا وُصل المدخل غير العاكس مع الأرض وطبق جهد على المدخل العاكس، فإن جهد خرج المضخم العملياتي يصل قيمة تساوي تقريباً جهد التغذية السالب (-Vs) بمجرد أن يُصبح (-V) جهد المدخل العاكس أكبر من جهد المدخل غير العاكس (+V)، أما عندما يكون (+V) > (-V) فإن جهد الخرج يساوي تقريباً جهد التغذية الموجب (+Vs). انظر الشكل (7-2)، ويحدث انتقال جهد الخرج إلى جهد التغذية الموجب عند وجود فارق ولو كان بسيطاً بين (+V) و(-V).



الشكل (7-2): توصيلات عاكسة وغير عاكسة بسيطة بدون تغذية عكسية وأشكال إشارات الدخل والخرج.

قد لا يكون المضخم العملياتي نال إعجابك من الوهلة الأولى لأن خرجه ينتقل بين جهد التغذية الموجب وجهد التغذية السالب عندما يكون هناك فرق بين جهود مدخليه مهما كان هذا الفرق بسيطاً. هذا شيء صحيح إذا كان المضخم مستخدماً كما في الشكل (7-2) ولكي نجعل المضخم العملياتي مفيداً لكثير من التطبيقات لابد من استخدام ما يسمى بالتغذية العكسية السالبة (negative feedback) في دارة المضخم العملياتي.



الشكل (7-3): دارة مضخم عملياتي عاكس بتغذية عكسية سالبة.

عند وصل خرج المضخم مع مدخله العاكس بواسطة مقاومة كما في الشكل (7-3) فإن هذا الوصل يخلق تغذية عكسية في الدارة، وهذه التغذية العكسية تسمى تغذية عكسية سالبة، وتستخدم التغذية العكسية السالبة في دارات المضخمات العملياتية للتحكم بالربح، حيث يصبح ممكناً منع الخرج من الوصول إلى الإشباع. في دارة الشكل (7-3) توصل مقاومة (R_F) بين خرج المضخم ومدخله العاكس، وتعمل هذه المقاومة على نقل حالة الخرج إلى دخل المضخم العملياتي، وتجبر هذه التغذية العكسية المضخم العملياتي على إعادة ضبط قيمة جهد خرجه على قيمة تتعلق بالمقاومة (R_F). تسمى دارة الشكل (7-3) مضخماً عاكساً ويُحسب جهد الخرج فيها من المعادلة:

$$V_{out} = -\frac{R_F}{R_{in}} . V_{in}$$

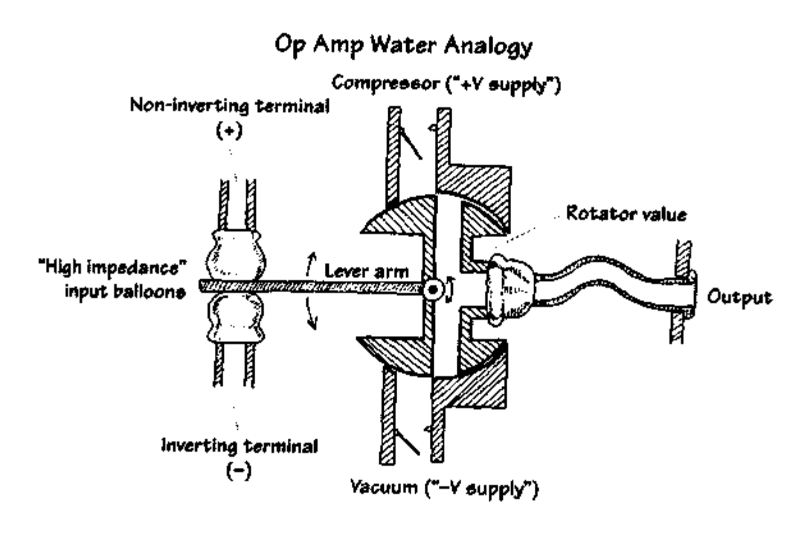
وسوف تتعرف لاحقاً في هذا الفصل على كيفية استخراج هذه المعادلة، وتدل إشارة الناقص في هذه المعادلة على أن الخرج معاكس للدخل بالصفحة أو أن فرق الصفحة بين الخرج والدخل يساوي (180°)، وهذا الفرق في الصفحة ناتج عن وصل إشارة الخرج إلى المدخل العاكس للمضخم العملياتي. تُسمى نسبة جهد الخرج إلى جهد الدخل باسم الربح ومن الواضح أن الربح يساوي $-\frac{R_F}{R_{in}}$. ومن ذلك تلاحظ أن زيادة المقاومة (R_F) تؤدي إلى زيادة جهد الخرج وبالتالي زيادة في ربح الجهد (Voltage gain)، أما تخفيض مقاومة التغذية العكسية فيؤدي إلى تخفيض ربح الجهد. بإضافة عناصر أخرى إلى دارة التغذية العكسية السالبة يمكن جعل المضخم العملياتي يقوم بالكثير من الأمور المفيدة إضافة إلى التضخيم. هناك دارات أخرى مفيدة للمضخم العملياتي مثل دارات منظمات الجهد، ومبدلات التيار إلى جهد، ومبدلات الجهد إلى تيار،

ودارات الهزازات، والدارات الحسابية (mathematical Circuits)، كدارات الجمع والطرح والضرب والمفاضلات والمكاملات، إضافة إلى دارات مولدات الموجات، والمرشحات الفعالة، وكواشف القمة (Peak detectors)، ودارات أخذ العينات ومسكها (Sample and hold circuits). ستغطى أغلب هذه الدارات في هذا الفصل. توجد تغذية عكسية موجبة (Positive Feedback) إضافة إلى التغذية العكسية السالبة، وفيها يوصل الخرج عبر مقاومة مثلاً مع المدخل غير العاكس للمضخم العملياتي، وللتغذية العكسية الموجبة تأثيرات معاكسة لتأثيرات التغذية العكسية السالبة وهي تقود المضخم العملياتي باتجاه الإشباع. ومع أن التغذية العكسية الموجبة نادرة الاستخدام، فإن لها تطبيقات في دارات المقارنات الخاصة التي تستخدم في دارات الهزازات. سوف تُدرس التغذية العكسية الموجبة بالتفصيل في هذا الفصل.

1.7: التشابه بين المضخم العملياتي ونموذج مائي

هذه المقارنة هي أقرب مقارنة ممكنة بين نموذج مائي ومضخم عملياتي وفيها نعتبر أن ضغط الماء مشابه للجهد وتدفق الماء مشابه لتدفق التيار، وسوف نسمي النموذج المائي للمضخم العملياتي باسم المضخم العملياتي المائي (Water op. amp).

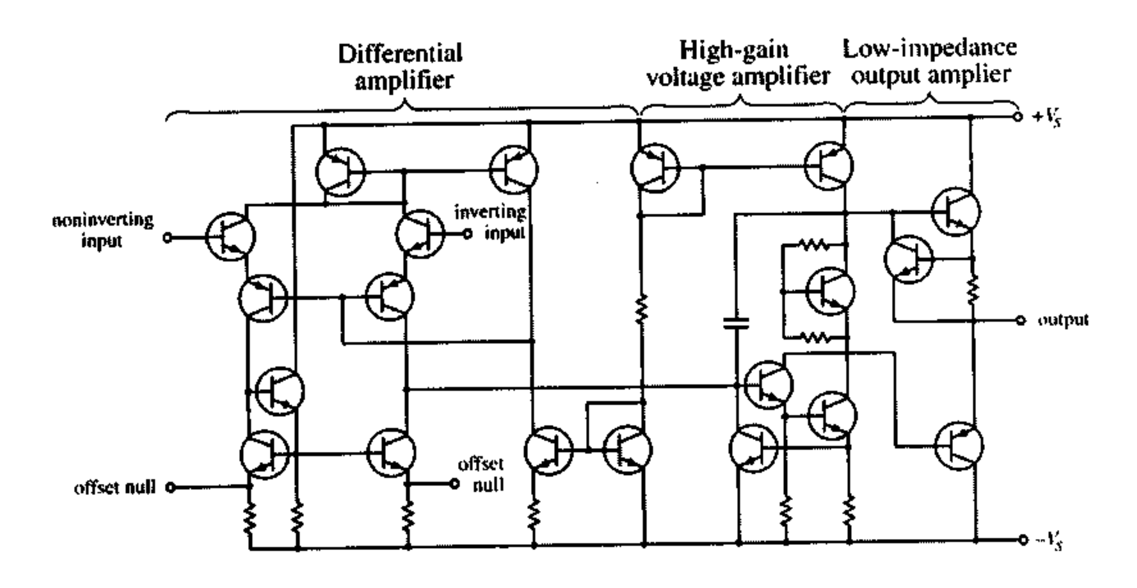
نعتبر أن المداخل العاكس وغير العاكس للمضخم العملياتي المائي ممثلة بأنابيب ذات نهايات على شكل بالونات مرنة. عندما يكون ضغط الماء المطبق على المدخلين متساوياً يكون ذراع الرافعة (Lever arm) متمركزاً في الوسط، أما عندما يكون ضغط الماء المطبق على المدخل غير العاكس أكبر من ضغط الماء المطبق على المدخل العاكس فإن البالون غير العاكس يتمدد ويدفع ذراع الرافعة إلى الأسفل ويدور الصمام الدوار بعكس عقارب الساعة ويفتح بذلك قنال من أنبوب الضاغط (المشابه لجهد التغذية الموجب) إلى أنبوب الخرج وهذه الحالة تشبه مضخماً عملياتياً حقيقياً يُقاد إلى الإشباع الموجب عندما يكون جهد المدخل غير العاكس أكبر من جهد المدخل العاكس. عندما يكون ضغط الماء المطبق على المدخل العاكس أكبر من ضغط الماء المطبق على المدخل غير العاكس يتمدد البالون العاكس إلى الأعلى محركاً الصمام الدوار مع عقارب الساعة وتفتح قنال بين أنبوب الضغط السالب (المشابه لمصدر التغذية السالب) إلى أنبوب الخرج، وهذه الحالة تشبه مضخم عملياتي يُقاد إلى الإشباع السالب. لاحظ في هذا النموذج أنه هناك مقاومة لا نهائية لضغط الماء في الدخل ومقاومة تساوي الصفر لضغط الماء في الخرج. كما ستلاحظ لاحقاً تكون ممانعات المداخل في المضخم العملياتي المثالي متماثلة وتعتبر هذه الممانعات لا نهائية، أما في المضخم الفعلي فقيم مقاومات الدخل عالية جداً ويوجد تيارات تسربية صغيرة جداً في المداخل. فكر بكيفية شرح آلية عمل التغذية العكسية السالبة في النموذج المائي.



الشكل (7-4): نموذج مائي مكافئ للمضخم العملياتي.

2.7: كيف يعمل المضخم العملياتي

المضخم العملياتي هو عنصر متكامل يحوي عدداً كبيراً من الترانزستورات والمقاومات والمكثفات. يبين الشكل (7-5) دارة مضخم عملياتي متعدد الاستخدامات ثنائي القطبية منخفض الكلفة.



الشكل (7-5): الدارة الكهربائية التفصيلية لمضخم عملياتي.

يتكون هذا المضخم العملياتي من ثلاث مراحل وهي:

مضخم تفاضلي بممانعة دخل عالية، ومضخم بربح جهد عالٍ مع دارة إزاحة مستوى (تسمح هذه الدارة للخرج بالتأرجح في الاتجاهين الموجب والسالب)، أما المرحلة الأخيرة فهي مضخم بممانعة خرج منخفضة. إن توضيح المراحل المكونة للمضخم العملياتي لا يساعدك كثيراً على فهم ما يجري بين الدخل والخرج وإذا كنت تريد بالضبط معرفة تغيرات الجهود والتيارات في الدارة الداخلية للمضخم العملياتي فإن هذا أمر صعب، والشيء المهم عند التعامل مع المضخمات العملياتية هو ليس التركيز على الدارة الداخلية للمضخم العملياتي وإنما يجب تذكر بعض القواعد التي تكفي تماماً لشرح وفهم آلية عمل المضخم العملياتي.

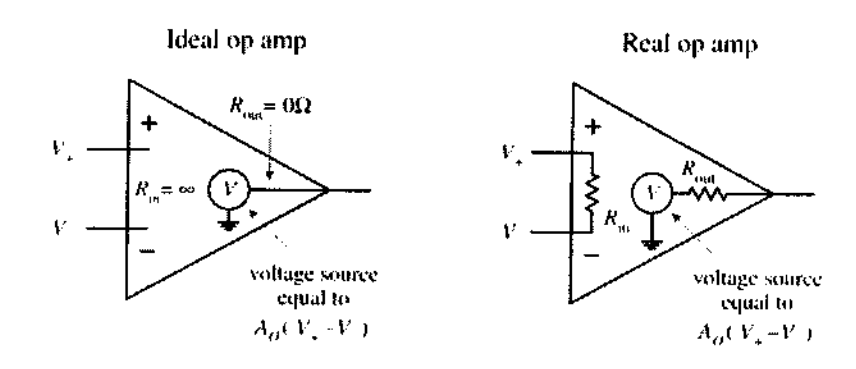
3.7: المبدأ النظري

نحتاج إلى معادلة واحدة لحل دارات المضخمات العملياتية، وهذه المعادلة هي الأساس الذي يستند إليه كل شيء، وهي علاقة جهد خرج المضخم العملياتي بجهود المداخل (+V غير العاكس) و(-V العاكس) وبربح الجهد للمضخم العملياتي عند تشغيله بنظام الحلقة المفتوحة (A0):

$$Vout = A_0(v_+ - v_-)$$

وتعبر هذه العلاقة عن أن المضخم العملياتي المثالي يعمل كمنبع جهد مثالي ويُعطى في خرجه جهداً يساوي $A_0 (V_+ - V_-)$، انظر الشكل (7-6) ولكن الأمور ستبدو أكثر تعقيداً عندما نبدأ بالتحدث عن المضخم العملياتي الفعلي (real Op Amp) وسوف نلاحظ بأن المعادلة السابقة تبقى نفسها في المضخم العملياتي الحقيقي ولكن علينا إجراء بعض التعديلات في الدارة

المكافئة. التغيرات التي تطرأ على المضخم العملياتي تأخذ بالاعتبار المواصفات التي تتأثر بعدم مثالية المضخم مثل مقاومة الدخل (R_{in} input resistance)، ومقاومة الخرج (R_{out} output resistance). ويبين الشكل (7-6) اليميني الدارة المكافئة الحقيقية للمضخم العملياتي.



الشكل (7-6): الدارات المكافئة للمضخم العملياتي (المثالية والفعلية).

تُعرف بارامترات المضخم العملياتي من خلال القواعد (rules) التالية وذلك بهدف إعطاء معنى لربح المضخم العملياتي عند تشغيله كحلقة مفتوحة وكذلك لإعطاء معنى ملموس للدارات المكافئة للمضخم العملياتي (المثالية والفعلية) والبارامترات التي ستعرف هي A_0، R_{in} وR_{out}.

القاعدة 1: قيمة ربح الجهد للحلقة المفتوحة في مضخم عملياتي مثالي ($A_0 = \infty$). أما في مضخم عملياتي حقيقي فإن (A_0) تتراوح بين (10^4) و(10^6).

القاعدة 2: قيمة مقاومة الدخل (R_{in}) للمضخم العملياتي المثالي هي ($R_{in} = \infty$) أما في المضخم الفعلي فهي من مرتبة (10^6) أوم للمضخمات المشكلة من ترانزستورات ثنائية القطبية ومن مرتبة (10^{12}) أوم لمضخم عملياتي من نوع **JFET**، أما مقاومة الخرج R_{out} فهي تساوي الصفر في المضخم المثالي ($R_{out}=0$) وتتراوح قيمتها في المضخمات الفعلية بين (10Ω) و(1000Ω).

القاعدة 3: لا تستهلك مداخل المضخم العملياتي المثالي تيارات، وهذا صحيح نظرياً فقط أي في المضخمات العملياتية المثالية، أما في المضخمات العملياتية الفعلية فتكون تيارات المداخل صغيرة جدا وقابلة للإهمال، وهي من مرتبة النانوأمبير للمضخمات ثنائية القطبية ومن مرتبة البيكوأمبير لمضخمات الـ **JFET**.

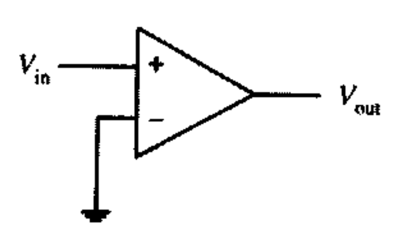
الآن وقد أصبحت مسلحاً بالعلاقة $V_{out} = A_0 (V_+ - V_-)$ وبالقواعد من (1) إلى (3) دعنا نطبق هذه العلاقة وتلك القواعد على بعض الأمثلة البسيطة.

المثال (1)

أوجد ربح جهد دارة الشكل (7-7).

الحل: بما أن (V_-) مؤرض (جهدها يساوي الصفر وV_+ موصول مع إشارة الدخل، فإن $V_+ = V_{in}$ وبالتعويض في المعادلة:

$$V_{out} = A_0(V_+ - V_-) \Rightarrow$$
$$V_{out} = A_0(V_{in} - 0) = A_0 V_{in} \Rightarrow$$
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = A_0$$



الشكل (7-7): دارة مقارن غير عاكس بسيطة.

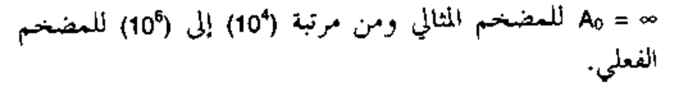
إذا اعتبرت المضخم العملياتي مثالياً يكون ($A_0 = \infty$)، أما إذا اعتبرته عادياً فإن A_0 تتراوح بين (10^4) و(10^6). تستخدم هذه الدارة كمقارن غير عاكس يُستخدم فيها الأرضي كجهد مرجعي. إذا كان ($V_{in}>0$) فإن الخرج يصل في الحالة المثالية إلى جهد ($+\infty V$) وفي الحالة العملية إلى قيمة تساوي جهد التغذية الموجب $+V_s$، أما إذا كان ($V_{in}<0$) فإن (V_{out}) يصل في الحالة المثالية إلى جهد ($-\infty V$) وفي الحالة العملية إلى ($-V_s$). قيم جهود الخرج تكون عملياً أصغر بقليل من جهود التغذية وتسمى ($+V_s$) و($-V_s$) بجهود الإشباع الموجب والسالب على الترتيب.

مثال (2)

أوجد (V_{out}/V_{in}) لدارة الشكل (7-8).

الحل: نلاحظ أن المدخل العاكس موصول مع (V_{in}) والمدخل غير العاكس مؤرض أي $V_+ = 0$ نعوض في المعادلة:

$$V_{out} = A_0(V_+ - V_-) \Rightarrow$$
$$V_{out} = A_0(0 - V_{in}) = -A_0 V_{in} \Rightarrow$$
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -A_0$$



$A_0 = \infty$ للمضخم المثالي ومن مرتبة (10^4) إلى (10^6) للمضخم الفعلي.

الشكل (7-8): مقارن عاكس بسيط.

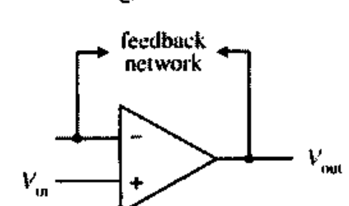
تعمل هذه الدارة كمقارن عاكس يستخدم فيه الأرضي كجهد مرجعي (refernce)

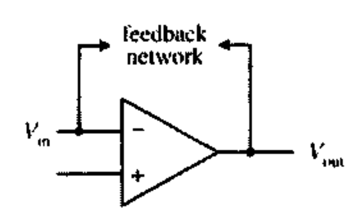
$$V_{in} > 0 \Rightarrow V_{out} = -V_S$$
$$V_{in} < 0 \Rightarrow V_{out} = +V_S$$

أي أن تأرجح جهد الخرج يكون بين جهود الإشباع الموجب والسالب. من غير المفيد هنا أن نكرر أن الخرج سيصل إلى جهد ($-\infty V$) إذا كان $V_{in}>0$ وإلى جهد يساوي ($+\infty V$) إذا كان $V_{in}<0$ لأن هذه الحالة مثالية والقيم الفعلية للجهود التي يصل إليها الخرج في الدارة العملية هي ($-V_s$) و($+V_s$).

4.7: التغذية العكسية السالبة

التغذية العكسية السالبة هي توصيل بين الخرج والدخل وفيها تتم إعادة جزء من الخرج إلى المدخل العاكس، ويمكن إعادة جزء من جهد الخرج إلى المدخل العاكس عبر مقاومة أو مكثف أو عبر دارة مركبة أو بالوصل المباشر. عندما تبدأ بتحليل دارة مضخم عملياتي تحوي تغذية عكسية سالبة يظهر لديك التساؤل: ما العلاقة التي سوف استخدمها في التحليل؟ طبعاً الجواب على ذلك هو أن العلاقة التي سوف تستخدمها تتعلق بدارة التغذية العكسية ولكن وكما ستلاحظ حالاً بأنه ليست هناك أية علاقة جديدة، وإنما يمكنك استخدام العلاقة ($V_{out}= A_0 (V_+-V_-)$) ولكن في هذه العلاقة عليك الانتباه إلى (V_-) حيث يجب أخذ تأثير الخرج على الدخل عند استخراج معادلة (V_-) ويجب استبدال V_- في المعادلة السابقة بـــ (FV_{out}) و F هنا هي جزء من الجهد. يوجد نوعان من دارات التغذية العكسية السالبة هما التغذية العكسية الجهدية (Voltage Feedback) والتغذية العكسية العملياتية (Operational feedback) كما في الشكل (7-9).





الشكل (7-9): النماذج الأساسية للتغذية العكسية السالبة.

إذن يمكنك تحليل دارات المضخمات العملياتية التي تحوي تغذية عكسية سالبة اعتماداً على العلاقة:

$$V_{out} = A_0(V_+ - FV_{out})$$

ليس من الضروري حساب (F) بشكل مستقل والغاية من وضعها في المعادلة هي فقط توضيح كيفية تأثير التغذية العكسية على قيمة الجهد عند المدخل العاكس (V_-) للمضخم العملياتي. سنوضح الآن أنه يمكن تحليل دارات المضخمات العملياتية ببساطة اعتماداً على الفكرة التالية:

$$V_{out} = A_0 (V_+ - V_-)$$

ومن العلاقة نلاحظ أن:

$$\frac{V_{out}}{A_0} = V_+ - V_-$$

ولكن (A_0) كبيراً جداً، لذلك يمكن اعتبار أن:

$$\frac{V_{out}}{A_0} \to 0$$

وعندها نكتب:

$$V_+ - V_- = 0 \Rightarrow V_+ = V_-$$

وهذه نتيجة هامة لتحليل دارات المضخمات العملياتية سوف نعتبرها القاعدة الرابعة والأخيرة.

القاعدة 4: عندما يُحس المضخم العملياتي بفرق في الجهد بين مداخله العاكس وغير العاكس فإن يستجيب لذلك بإعادة جزء من تيار الخرج أو جهده عبر دارة التغذية العكسية إلى المدخل العاكس بحيث يبقى الفرق بين جهود المداخل مساوياً للصفر، أي ($V_+ - V_- = 0$)، وتطبق هذه القاعدة على دارات التغذية العكسية السالبة. تبين لك الأمثلة التالية كيفية استخدام القاعدة الرابعة عند حل مسائل أو دارات مضخمات التغذية العكسية السالبة.

مسائل حول مضخمات عملياتية تحوي تغذية عكسية سالبة

دارة عازل (Buffer) تعطي ربح جهد يساوي الواحد

أوجد العلاقة ($\frac{V_{out}}{V_{in}}$) للدارة المبينة في الشكل (7-10).

الحل: بما أن الدارة تحوي تغذية عكسية سالبة فبالإمكان استخدام القاعدة الرابعة:

$$V_+ - V_- = 0 \Rightarrow V_+ = V_-$$

ومن الشكل تلاحظ أن: $V_+ = V_{in}$

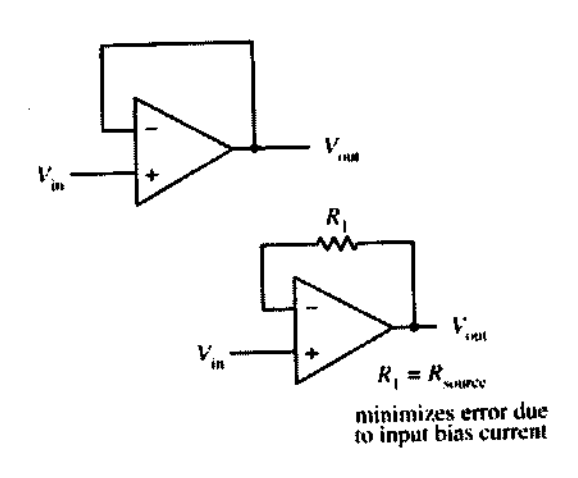
وبالتالي فإن: $V_- = V_{in}$

ولكن: $V_{out} = V_{in} \Rightarrow$

إذن: $Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$

والربح يساوي الواحد تعني أن المضخم لا يحقق أي ربح وجهد الخرج يتبع جهد الدخل. قد يبدو للوهلة الأولى أن هذه الدارة عديمة الفائدة، ولكن تذكر أن ممانعة الدخل للمدخل غير العاكس عالية جداً، أما مقاومة الخرج في المضخم العملياتي فهي منخفضة وهذه الميزات تجعل هذه الدارة مفيدة جداً لعزل الدارات.

في الدارات العملية للعازل توصل مقاومة بين الخرج والمدخل العاكس، كما هو مبين في الدارة السفلية من الشكل (7-10)، وتعمل هذه المقاومة على تخفيض أخطاء انزياح الجهد (Voltage offset errors) إلى الحد الأدنى، وهذه الأخطاء تنتج عن تيارات انحياز الدخل (تيارات التسريب Leakage Currents). مقاومة التغذية العكسية يجب أن تساوي مقاومة مصدر الإشارة (Source). سوف نناقش تيارات انحياز الدخل لاحقاً في هذا الفصل.

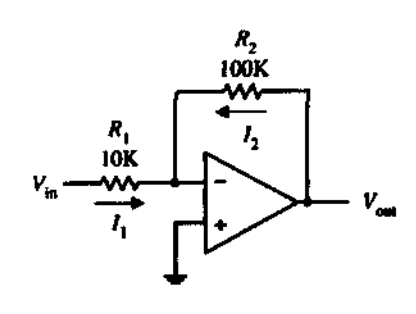


الشكل (7-10): دارة مضخم عازل.

مضخم عاكس *Inverting Amplifier*

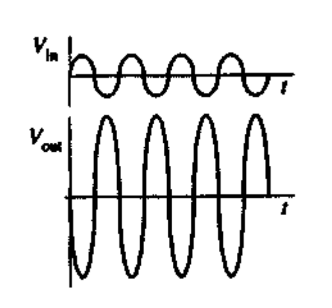
أوجد علاقة ($\frac{V_{out}}{V_{in}}$) لدارة الشكل (7-11).

بما أن دارة المضخم تحوي تغذية عكسية سالبة فبالإمكان استخدام القاعدة الرابعة ويحاول المضخم العملياتي أن يجعل الفرق بين جهود المداخل مساوياً للصفر. بما أن ($V_+ = 0$) فإن (V_-) سيكون صفراً أيضاً. من أجل إيجاد الربح يجب إيجاد التيارات (I_1) و(I_2) ومن علاقات التيارات يمكن الحصول على علاقة (V_{out}/V_{in}). نوجد التيارات (I_1) و(I_2) اعتماداً على قوانين أوم:



$$I_1 = \frac{V_{in} - V_-}{R_1} = \frac{V_{in} - 0V}{R_1} = \frac{V_{in}}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_{out} - V_-}{R_2} = \frac{V_{out} - 0V}{R_2} = \frac{V_{out}}{R_2}$$



بما أن مقاومات مداخل المضخم العملياتي عالية جداً فبالإمكان إهمال تيار المدخل العاكس، ولذلك يمكن تطبيق قانون كيرشوف للتيار عند المدخل العاكس:

الشكل (7-11): دارة مضخم عملياتي عاكس.

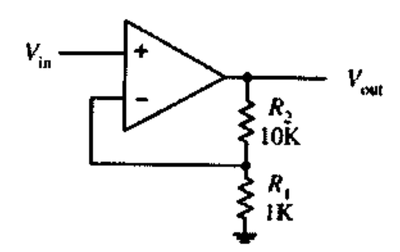
$$I_2 = -I_1 \Rightarrow$$

$$\frac{V_{out}}{R_2} = -\frac{V_{in}}{R_1} \Rightarrow$$

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

تدل إشارة الناقص على وجود فرق صفحة بين الخرج والدخل مقداره (180°) أي أن الخرج معاكس للدخل بالصفحة. إذا كان $R_2 = R_1$ يصبح الربح مساوياً (1-) ومرة ثانية تدل إشارة الناقص أن الخرج معكوس بالنسبة للدخل وتسمى الدارة في هذه الحالة باسم عاكس بربح يساوي الواحد (Unity gain inverter). من الضروري وضع مقاومة تساوي ($R_1 \| R_2$) بين المدخل العاكس والأرض لتخفيض الأخطاء الناتجة عن انزياحات الجهود إلى الحد الأدنى، وتنشأ انزياحات الجهود عن الفروقات بين تيارات انحياز المداخل في المضخم العملياتي الفعلي.

مضخم غير عاكس



في هذه الدارة نلاحظ أن:

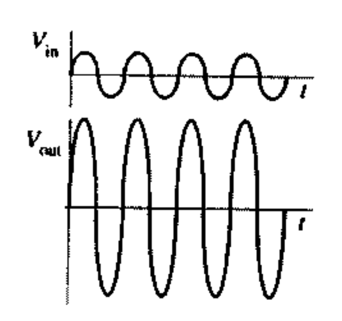
$$V_- = \frac{V_{out} R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_+ = V_{in}$$

واعتماداً على القاعدة الرابعة:

$$V_+ = V_- \Rightarrow V_{in} = \frac{V_{out} R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow$$

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



إشارة خرج هذا المضخم، بعكس الدارة السابقة، مطابقة بالصفحة لإشارة الدخل، ولذلك يُقال إن الخرج غير معكوس (non inverted). يجب أن تكون ($R_1 \| R_2 = R_{source}$) في الدارة العملية من أجل تخفيض أخطاء انزياح الجهد الناتج عن تيار انحياز الدخل (input bias Current).

الشكل (7-12): دارة مضخم عملياتي غير عاكس.

مضخم الجمع

أوجد V_{out} لدارة الشكل (7-13) بدلالة V_1 وV_2.

بما أن الدارة تحوي تغذية عكسية سالبة فإننا نستطيع استخدام العلاقة:

$$V_+ = V_-$$

وبما أن:

$$V_+ = 0$$

فإن (V_-) سيكون مساوياً أيضاً للصفر:

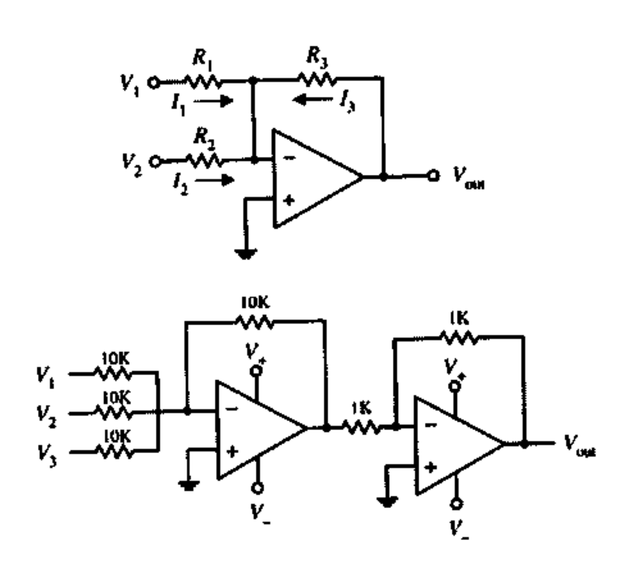
$$V_- = 0$$

لإيجاد العلاقة بين (V_{out}) وجهود المداخل (V_1) و(V_2) نوجد التيارات (I_1)، و(I_2) و(I_3) ونطبق قانون كيرشوف للتيارات عند المدخل العاكس للمضخم العملياتي ونعتبر أن تيار المدخل العاكس مهمل لأن مقاومة المدخل العاكس عالية جداً.

$$I_1 = \frac{V_1 - 0V}{R_1} = \frac{V_1}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_2 - 0V}{R_2} = \frac{V_2}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{V_{out} - 0V}{R_3} = \frac{V_{out}}{R_3}$$



الشكل (7-13): دارة مضخم جمع

وحسب قانون كيرشوف للتيارات عند المدخل العاكس نجد أن:

$I_3 = -(I_1+I_2)$

$$\frac{V_{out}}{R_3} = -\frac{V_1}{R_1} - \frac{V_2}{R_2} \Rightarrow$$

$$V_{out} = -\frac{R_3}{R_1}V_1 - \frac{R_3}{R_2}V_2 = -(\frac{R_3}{R_1}V_1 + \frac{R_3}{R_2}V_2)$$

إذا جعلنا $R_3 = R_2 = R_1$ عندها سيكون

$V_{out} = -(V_1 + V_2)$

لاحظ أن المجموع معكوس، وللحصول على مجموع غير معكوس تستخدم مرحلة ثانية بعد دارة الجمع كما في الشكل (7-13) السفلي وفيها تلاحظ أن للدارة ثلاثة مداخل ويُعطى جهد الخرج النهائي بالعلاقة:

$V_{out} = V_1 + V_2 + V_3$

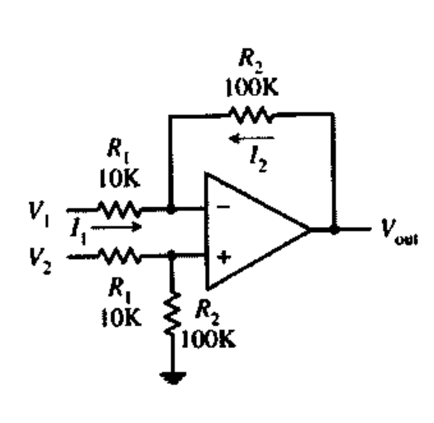
توصل مقاومة بين المدخل غير العاكس والأرض لتخفيض الأخطاء الناتجة عن جهد الانزياح الذي ينشأ أصلاً عن تيارات انحياز المداخل وقيمة هذه المقاومة تساوي المقاومة المكافئة لمقاومة التغذية العكسية على التوازي مع كافة مقاومات المداخل، أو:

$R = R_3 || (R_1 || R_2)$

وذلك طبعاً للدارة العلوية في الشكل (7-13).

مضخم تفاضلي

أوجد علاقة V_{out} لدارة الشكل (7-14):



الشكل (7-14): دارة مضخم تفاضلي.

لإيجاد علاقة جهد الخرج نوجد (V_+) ثم نوجد (V_-) وبما أن الدارة تحوي تغذية عكسية سالبة تستطيع اعتبار ($V_+ = V_-$).

$$V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V_2$$

وحسب قانون كيرشوف للتيارات عند المدخل العاكس نجد:

$$\frac{V_1 - V_-}{R_1} = \frac{V_- - V_{out}}{R_2} \Rightarrow \frac{V_1}{R_1} - \frac{V_-}{R_1} = \frac{V_-}{R_2} - \frac{V_{out}}{R_2} \Rightarrow$$

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_{out}}{R_2} = V_-(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}) = V_-(\frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}) \Rightarrow$$

$$V_- = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}\left[\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_{out}}{R_2}\right] = \frac{V_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{V_{out} R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_+ = V_- \Rightarrow \frac{V_2 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{V_{out} R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow$$

$$V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}\left[\frac{V_2 R_2}{R_1 + R_2} - \frac{V_1 R_2}{R_1 + R_2}\right]$$

أو

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1)$$

إذا جعلنا $R_2 = R_1$ يكون الخرج:

$$V_{out} = V_2 - V_1$$

المكامل Integrator

بما أن الدارة تحوي تغذية عكسية سالبة فإن $(V_+ = V_-)$
ومن الدارة نلاحظ أن:

$$V_+ = 0 \Rightarrow V_- = 0$$

باعتبار أن تيار المدخل العاكس للمضخم العملياتي مهمل، وحسب قانون كيرشوف للتيار نجد أن:

$$I_R = -I_C$$

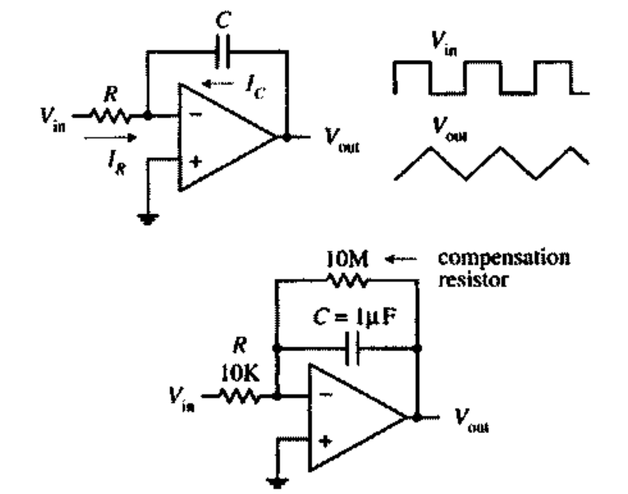
$$I_R = \frac{V_{in} - 0V}{R} = \frac{V_{in}}{R}$$

$$I_C = C.\frac{dV}{dt} = C\frac{d(V_{out} - 0V)}{dt} = C.\frac{dV_{out}}{dt}$$

وبمساواة التيارات نجد أن:

$$\frac{V_{in}}{R} = -C.\frac{dV_{out}}{dt} \Rightarrow$$

$$V_{out} = -\frac{1}{RC}\int V_{in}dt$$



الشكل (7-15): دارة مكامل.

تسمى هذه الدارة دارة مكامل (integrator).

وإشارة الخرج هي تكامل إشارة الدخل. في الدارة العلوية من الشكل توجد مشكلة وهي انحراف جهد الخرج حتى لو كان الدخل موصولاً مع الأرضي وذلك بسبب عدم مثالية مميزات المضخم العملياتي الناتجة عن جهود الإنزياح وتيارات الانحياز.

توصل مقاومة عالية على التوازي مع المكثف وتؤمن هذه المقاومة تغذية عكسية للتيارات المستمرة وتؤمن استقراراً في الاستقطاب، وكذلك يجب وصل مقاومة تعويض (Compensation Resistor) بين المدخل غير العاكس والأرض وذلك من أجل تصحيح أخطاء انزياح الجهد الناتجة عن تيارات الانحياز، وقيمة هذه المقاومة يجب أن تساوي مقاومة المدخل العاكس على التوازي مع مقاومة التغذية العكسية.

المفاضل

أوجد علاقة V_{out} لدارة الشكل (7-16) بدلالة (V_{in}).

الحل: تنطبق على هذه الدارة القواعد التالية:

$$V_+ = V_- = 0$$

تيار المدخل العاكس مهمل لأن مقاومته عالية:

$$I_- = 0;$$

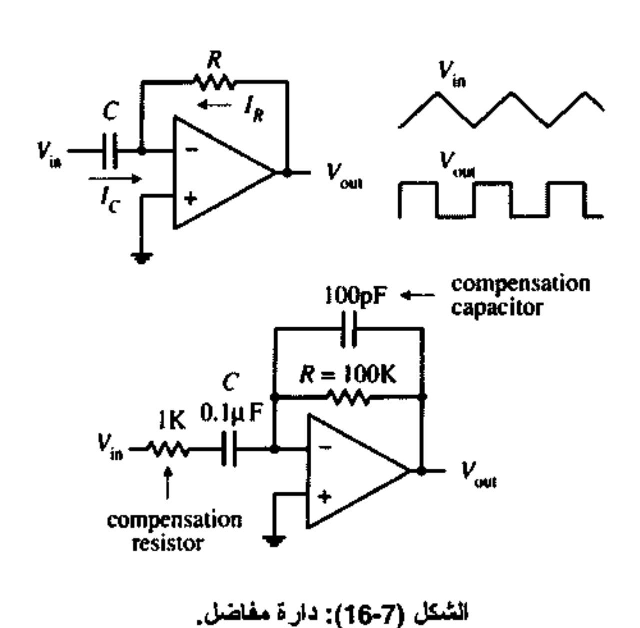
$$I_R = -I_C$$

$$I_C = C\frac{dV}{dt} = C\frac{d(V_{in} - 0)}{dt} = C\frac{dV_{in}}{dt}$$

$$I_R = \frac{V_{out} - V_-}{R} = \frac{V_{out} - 0V}{R} = \frac{V_{out}}{R}$$

$$\frac{V_{out}}{R} = -C\frac{dV_{in}}{dt} \Rightarrow$$

$$V_{out} = -RC\frac{dV_{in}}{dt}$$



الشكل (16-7): دارة مفاضل.

تسمى هذه الدارة دارة مفاضل differentiator وإشارة الخرج تتناسب مع تفاضل إشارة الدخل. الدارة الموجودة في أعلى الشكل (16-7) ليست دارة عملية وذلك لأنها حساسة جداً للضجيج بسبب الربح العالي للمضخم العملياتي.

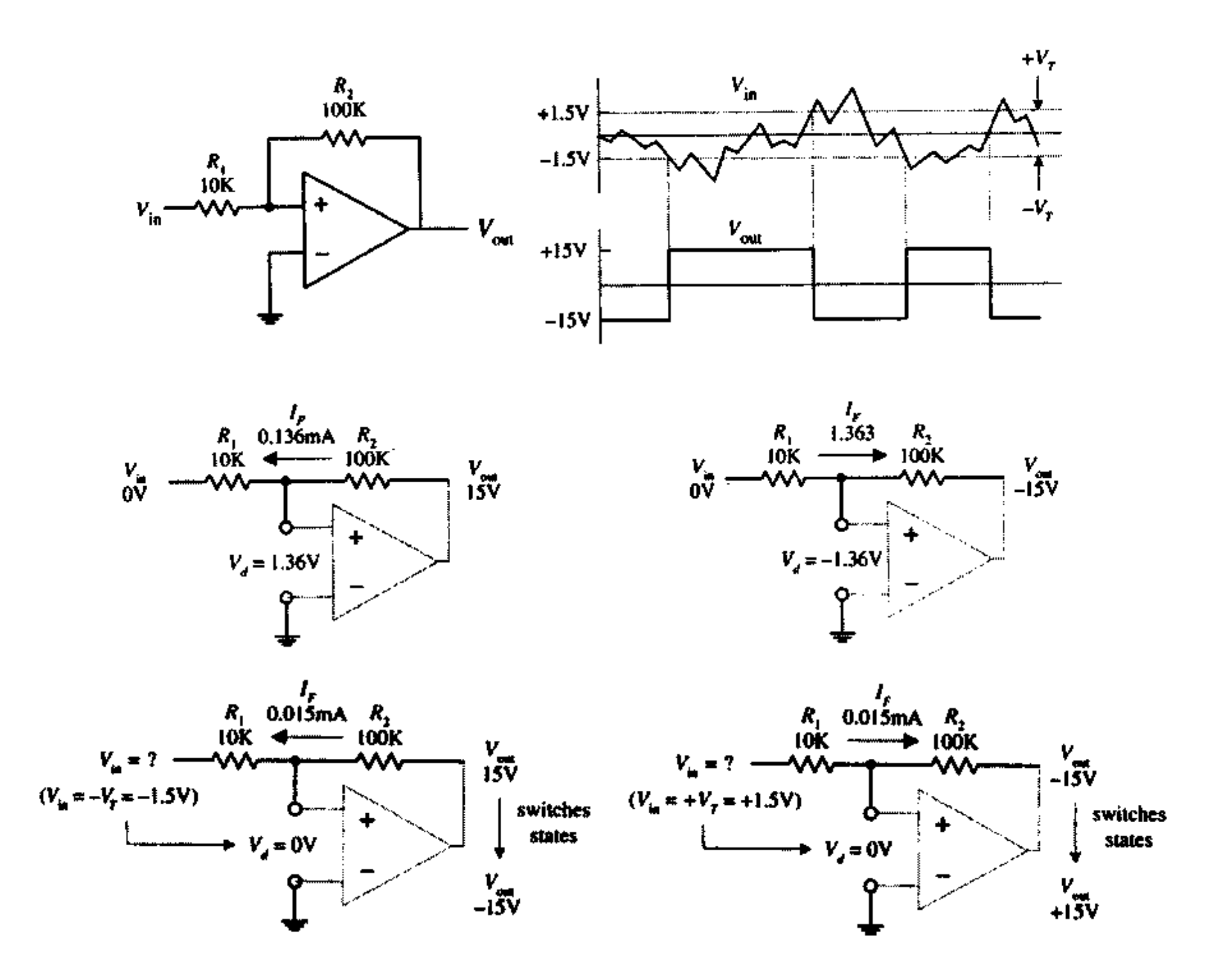
إن دارة التغذية العكسية للمفاضل تعمل كمرشح تمرير منخفض RC يعطي تأخيراً بالصفحة قدره (90°) ضمن الحلقة ويمكن أن يسبب مشاكل في الاستقرار. والدارة المبينة في الأسفل هي الدارة العملية للمفاضل. في الدارة السفلية يُضاف مكثف تغذية عكسية يسمى مكثف تعويض ويوصل بين الخرج والمدخل العاكس على التوازي مع المقاومة الأساسية للمفاضل، كما توصل مقاومة تعويض على التسلسل مع المكثف الموصول بين (V_{in}) والمدخل العاكس، وتساهم عناصر التعويض هذه بحل مشاكل الضجيج والاستقرار. تؤمن عناصر التعويض تردد قطع عالياً من أجل تخفيض الضجيج عالي التردد، كما تؤمن هذه العناصر تقدماً بالصفحة قدره (90°) يلغي التأخير الصفحي (90°). ولكن عناصر التعويض تؤدي إلى تخفيض تردد العمل الأعظمي للدارة– فعلى الترددات العالية جداً يصبح المفاضل مكاملاً. أخيراً توصل مقاومة بين المدخل غير العاكس والأرض قيمتها تساوي مقاومة التغذية العكسية ووظيفة هذه المقاومة تقليل تأثير تيارات الانحياز على الإزاحة في جهد الخرج.

5.7: التغذية العكسية الموجبة

يُعاد جزء من إشارة خرج المضخم العملياتي إلى المدخل غير العاكس في التغذية العكسية الموجبة، وبالعودة إلى المعادلة ($V_{out} = A_0 (V_+ - V_-)$) تلاحظ أنه إذا كانت لديك تغذية عكسية موجبة في الدارة فإنه عليك التعويض عن (V_+) بالمقدار (FV_{out}) وF هي جزء من جهد الخرج العائد إلى الدخل. هناك شيء هام يجب ملاحظته في هذه المعادلة (وفي التغذية العكسية الموجبة بشكل عام) وهو أن جهد التغذية العكسية العائد من الخرج إلى المدخل غير العاكس يقود المضخم العملياتي أكثر فأكثر باتجاه الإشباع، وهذا ناتج عن أن FV_{out} يُضاف إضافة في المعادلة، أما في التغذية العكسية السالبة فكان التأثير معاكساً للتغذية العكسية الموجبة وذلك لأن ($FV_{out} (= V_-)$) في التغذية العكسية السالبة يُطرح كما في العلاقة ($V_{out} = A_0 (V_+ - FV_{out})$) وبذلك فإن يخفف أو يعاكس وصول الخرج إلى الإشباع. تعتبر التغذية العكسية الموجبة غير مرغوبة في دارات المضخمات بعكس التغذية العكسية السالبة، وذلك لأن التغذية العكسية السالبة تساعد على التحكم بالربح وهذا هو الشيء المطلوب في أغلب الحالات، وطبعاً لا يرغب أحد بأن ينتقل المضخم الذي لديه إلى حالة الإشباع (تغذية عكسية موجبة).

للتغذية العكسية الموجبة استخدامات مفيدة وخاصة في المقارنات حيث تجعل التغذية العكسية الموجبة تأرجحات الخرج أكثر وضوحاً. يمكن جعل المضخم العملياتي المستخدم كمقارن يعمل وفق عروة (hysteresis) معينة وذلك بضبط قيمة مقاومة التغذية العكسية الموجبة والعروة تعطي المقارن عتبتين ويسمى الجهد بين العتبتين باسم جهد العروة (hysteresis voltage) وعند العمل على عتبتين (بدلاً من عتبة واحدة) فإن المقارن يُصبح أكثر مناعة ضد الضجيج الذي

يمكن أن يؤدي إلى قدح (إثارة) تأرجحات غير مرغوبة في جهد الخرج. ولفهم العروة أكثر انظر إلى دارة المقارن المبينة في الشكل (17-7) والتي تحوي تغذية عكسية موجبة.



الشكل (17-7): مقارن يحوي تغذية عكسية موجبة.

بفرض أن خرج المضخم العملياتي في حالة الإشباع الموجب (+15V). إذا كان $V_{in} = 0V$، فإن فرق الجهد بين المدخل العاكس وغير العاكس (V_d) سيكون (1.36V) ويمكن الحصول على قيمة (V_d) من الدارة اعتماداً على قوانين كيرشوف:

$$I_F = \frac{V_{out} - V_{in}}{R_1 + R_2};\ V_d = I_F R_1$$

وهذا الجهد (V_d) لا يؤثر نهائياً على جهد الخرج فيبقى الخرج في حالة إشباع موجب (+15V). إذا تم تخفيض (V_{in}) فإن (V_d) سيصبح عند نقطة ما مساوياً الصفر، وفي هذه الحالة يغير الخرج حالته، ويسمى هذا الجهد بجهد العتبة السالب negative threshold voltage ($-V_T$). يمكن تحديد قيمة جهد العتبة السالب من المعادلتين السابقتين والنتيجة النهائية هي:

$$-V_T = \frac{-V_{out}}{(R_2 / R_1)}$$

وفي المثال ستكون ($-V_T = -1.5V$).

إذا كان الخرج الآن في حالة إشباع سالب (-15V) وطبق جهد (0V) على الدخل فإن V_d سيكون (V_d = -1.36V) ويبقى الخرج على حالة (-15V) ولكن وبزيادة جهد الدخل يصل (V_d) مرة ثانية وعند نقطة ما إلى الصفر وعندها يغير الخرج حالته. تسمى هذه النقطة بجهد العتبة الموجب ($+V_T$) Positive threshold voltage وهذا الجهد يساوي:

$$+V_T = \frac{+V_{out}}{(R_2 / R_1)}$$

وهو في المثال يساوي (+1.5V).

يسمى فرق الجهد بين جهد العتبة الموجب وجهد العتبة السالب بجهد العروة ويرمز له بالرمز (V_h) إذن:

$$V_h = +V_T - (-V_T)$$

وفي مثالنا هذا نجد أن V_h = 3V.

6.7: الأنواع الحقيقية من المضخمات العملياتية

المضخمات العملياتية متعددة الأغراض

تتوفر أنواع عديدة جداً من المضخمات العملياتية التي يمكن استخدامها في التطبيقات العامة، بالإضافة إلى مضخمات عملياتية عالية الدقة، وتصمم المضخمات العملياتية عالية الدقة بحيث تكون عالية الاستقرار، وذات جهود انزياح منخفضة، وتيارات انحياز منخفضة أيضاً إضافة إلى بارامترات انحراف منخفضة. بما أن إمكانية الاختيار في المضخمات العملياتية واسعة جداً، فإننا نترك ذلك لك لتبحث في الكتالوجات الإلكترونية بنفسك وترى أنواع المضخمات العملياتية المتوفرة. وعند البحث في الكتالوكات ستجد أن المضخمات العملياتية (وليس فقط المضخمات عالية الدقة ومتعددة الاستخدامات) تنتمي إلى أحد الأصناف التالية (وذلك تبعاً لدارة الدخل في المضخم العملياتي):

- مضخمات عملياتية ثنائية القطبية.
- مضخمات عملياتية حقلية JFET.
- مضخمات عملياتية MOSFET.
- مضخمات عملياتية هجينة BIFET.

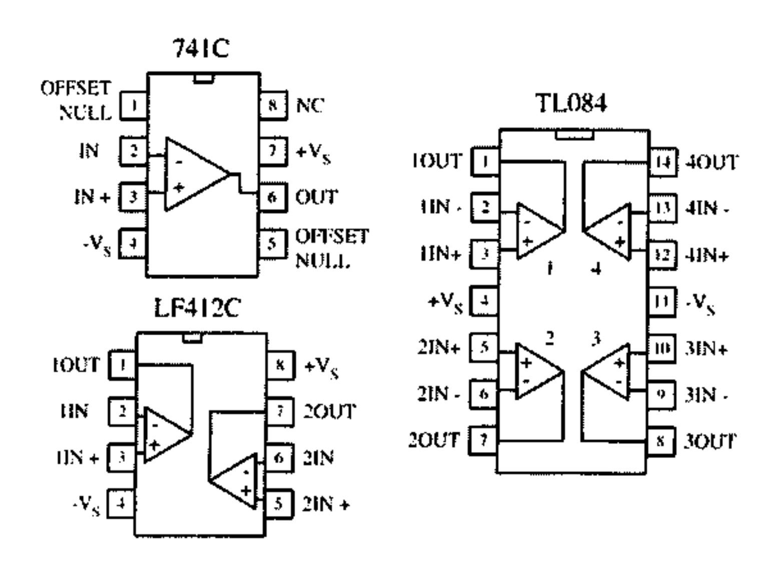
وعموماً تكون تيارات المداخل في المضخم العملياتي متعدد الاستخدامات 741 ثنائي القطبية أكبر من الأنواع التي تنتمي إلى الأصناف JFET وMOSFET، وهذا يعني أن تيار الاستقطاب يؤدي إلى خلق هبوطات جهد على مقاومات شبكة التغذية العكسية أو شبكة الانحياز أو مقاومات مصادر الإشارة وهذه الجهود قد تؤدي إلى حدوث انزياح في جهد الخرج ويتعلق مقدار الانزياح المسموح بالتطبيق الذي تستخدم الدارة فيه. وكما ذكر سابقاً في هذا الفصل توصل مقاومة بين المدخل غير العاكس والأرض لأن هذه المقاومة تقلل من الانزياح في جهد الخرج الناتج عن تيارات الانحياز.

المضخمات العملياتية الدقيقة

يمكن تجنب المشاكل الناشئة عن تيارات الانحياز في دارات المضخمات العملياتية باستخدام مضخمات من نوع FET. تيارات الانحياز لمداخل المضخمات العملياتية من نوع JFET صغيرة جداً (من مرتبة الـ pA) مقارنة مع تيارات مداخل المضخمات العملياتية ثنائية القطبية والتي كانت من مرتبة النانوأمبير. تبلغ قيم تيارات انحياز المداخل في بعض أنواع المضخمات العملياتية من نوع MOSFET قيماً صغيرة جداً جداً، إذ لا تتجاوز بضعة أعشار البيكوأمبير. إذن للمضخمات العملياتية نوع FET تيارات انحياز دخل أصغر من تيارات مضخمات عملياتية ثنائية القطبية إلا أن مضخمات الـ FET لها بعض المواصفات الأخرى غير المرغوبة مثل ظاهرة الانعكاس الصفحي (Phase inversion) فمثلاً إذا أصبح جهد النمط

المشترك (Common mode voltage) لمضخم عملياتي نوع JFET قريباً من جهد التغذية السالب فإن مداخل المضخم العملياتي قد تنعكس وظائفها وتتحول التغذية العكسية السالبة إلى موجبة ويصبح المضخم غير مستقر. يمكن تلافي هذه المشكلة بتحديد مجال إشارة النمط المشترك. ونبين فيما يلي مقارنة بسيطة لبعض بارامترات المضخمات العملياتية ثنائية القطبية، والحقلية JFET ونوع MOSFET:

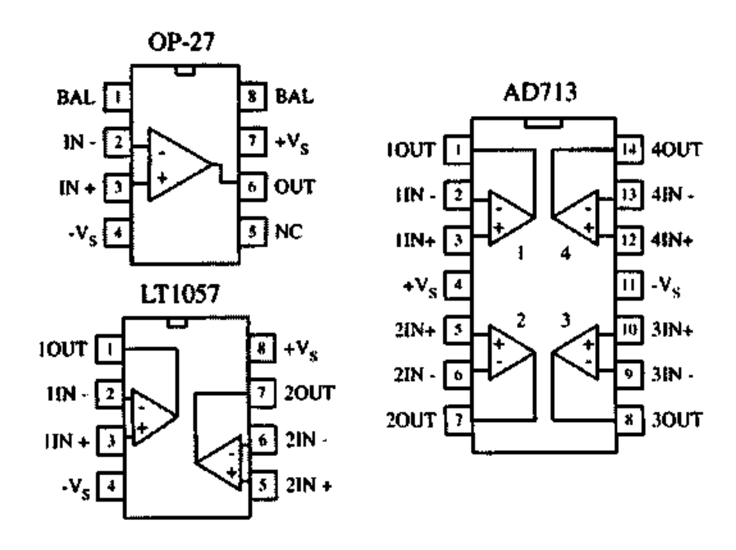
- جهد الانحراف: منخفض في ثنائية القطبية، متوسط في JFET، متوسط إلى عالٍ في MOSFET.
- انزياح الانحراف: منخفض في ثنائية القطبية، متوسط في FET.
- توافق الانحياز: ممتاز في المضخمات ثنائية القطبية، معتدل في FET.
- تغيرات الانحياز بتغير درجة الحرارة: منخفضة في ثنائية القطبية، ومعتدلة في FET.



الشكل (7-18): دارات متكاملة لمضخمات عملياتية متعددة الاستخدامات.

من الأسهل على المستثمر التركيز على مواصفات المضخمات العملياتية التي تعطى في الكتالوكات بدلاً من الدخول في متاهات التعارضات الناتجة عن الفروقات بين تقنيات التصنيع. أهم المواصفات التي يجب البحث عنها عند اختيار مضخم عملياتي هي.

السرعة (Speed)، معدل التباطؤ (Slewrate)، ضجيج الدخل (input noise)، جهود انزياح الدخل وانحرافاتها، تيارات الانحياز وانحرافاتها، التيارات المستهلكة من مصادر جهود التغذية، تبديد الاستطاعة، ومجال درجات حرارة العمل. كما يجب الانتباه إلى خاصية أخرى عند شراء مضخم عملياتي وهي هل المضخم معوَّض ترددياً بشكل داخلي أو يحتاج إلى تعويض ترددي خارجي، فالمضخم ذو التعويض الخارجي يحتاج إلى توصيل عناصر خارجية معه لمنع الربح من الانخفاض بحدة عند زيادة التردد، لأن ذلك قد يؤدي إلى حدوث ظاهرة الانعكاس الصفحي والاهتزاز (Oscillation)، أما في المضخمات المعوضة داخلياً فيتم تلافي حدوث ذلك دون الحاجة لعناصر إلكترونية خارجية. سوف نشرح الكثير من المصطلحات الواردة في هذه الفقرة بتفصيل أكبر في الفقرات القادمة.

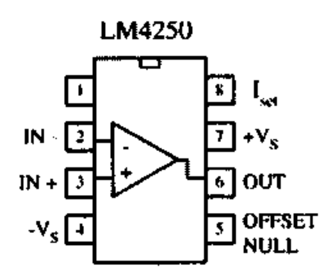


الشكل (7-19): دارات متكاملة لبعض أنواع المضخمات العملياتية.

المضخم العملياتي القابل للبرمجة

المضخم العملياتي القابل للبرمجة هو مضخم متعدد الجوانب يستخدم بشكل أساسي في التطبيقات منخفضة القدرة (في الدارات التي تغذى من بطاريات). يمكن أن يبرمج هذا المضخم العملياتي بتيار خارجي للحصول على مواصفات معينة مرغوبة. بعض المواصفات التي يمكن تغييرها بواسطة تيار البرمجة هي:

تبديد الاستطاعة، تيارات انزياح الدخل واستقطابه، معدل التباطؤ، جداء الربح وعرض الحزمة، وضجيج الدخل، وعادة يتم سحب تيار البرمجة من قبل رجل البرمجة (Programming pin)، مثلاً الرجل رقم (8) للمضخم LM4250 المبين في الشكل (7-20).



الشكل (7-20): الدارة المتكاملة LM4250 لمضخم قابل للبرمجة.

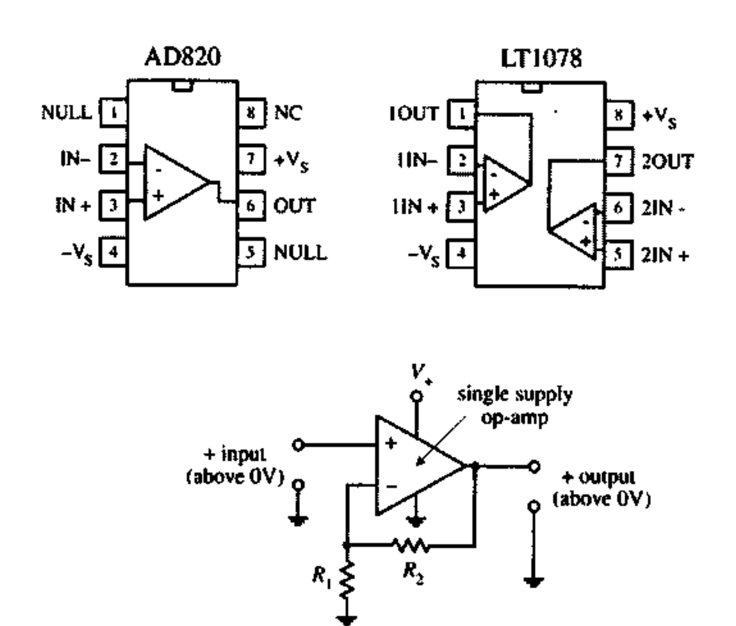
يسمح تيار البرمجة للمضخم العملياتي بالعمل ضمن مجال واسع من تيارات التغذية (Supply Currents)، من بضعة ميكروأمبير إلى بضعة ميللي أمبير.

بما أن مواصفات المضخم العملياتي القابل للبرمجة يمكن تغييرها بحيث يبدو المضخم وكأنه مضخم مختلف عند تيارات برمجة مختلفة، فإنه بالإمكان استخدام مضخم عملياتي واحد لوظائف مختلفة ضمن منظومة معينة. يمكن أن تعمل المضخمات العملياتية القابلة للبرمجة عادة من جهود منخفضة (مثلاً 1V في المضخم LM4250). تنتج العديد من الشركات الصانعة مضخمات عملياتية قابلة للبرمجة ولذلك عليك الإطلاع على الكتالوكات وللتعرف أكثر على كيفية استخدامها عليك

العودة إلى المراجع فمثلاً يمكنك الحصول على معلومات عن كيفية استخدام المضخم العملياتي LM4250 الذي تنتجه شركة National Semiconductor من موقع الإنترنت (www.national.com).

المضخمات العملياتية التي تغذى من مصدر تغذية مستمر وحيد

تُصمَّم هذه المضخمات بحيث تغذى من مصدر جهد مستمر موجب وحيد (مثلاً +12V) ويسمح فيها أثناء العمل بانخفاض جهد الدخل حتى قيمة تساوي الصفر. يبين الشكل (7-21) مضخم dc بسيطاً يُستخدم فيه مصدر تغذية وحيد. من الجدير بالذكر أن خرج المضخم المبين لا يمكن أن يصبح سالباً، ولذلك لا يمكن استخدام هذا المضخم للتعامل مع إشارات صوتية تُربط معه بواسطة مكثف. تستخدم هذه المضخمات العملياتية على الأغلب في الأجهزة التي تغذى من بطاريات.



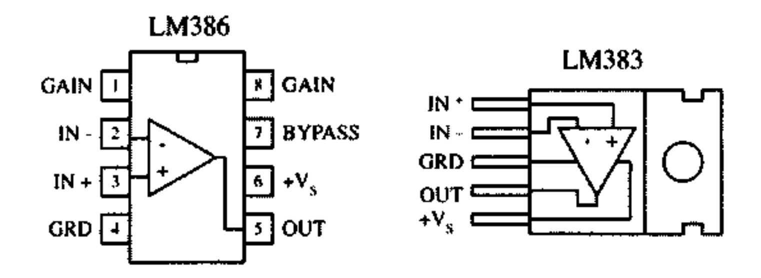
الشكل (7-21): دارات متكاملة لمضخمات عملياتية تُغذى من مصدر مستمر وحيد.

المضخمات العملياتية الصوتية

تعتبر هذه المضخمات العملياتية بشكل عام من المضخمات العملياتية التقليدية ولكنها تصمم لتعطي أفضل أداء في المجال الترددي الصوتي في (20Hz) وحتى (20kHz) وتمتاز بانخفاض الضجيج في المجال الترددي الصوتي وبانخفاض تشويه العبور (Crossover distortion). تستخدم هذه المضخمات بشكل أساسي في المضخمات الأولية الحساسة، وفي النظم الصوتية، وفي مستقبلات الـــ AM والـــ FM. وكمضخمات سيرفو وفي دارات الاتصال الداخلي (الإنترفونات). توجد أنواع عديدة من المضخمات العملياتية الصوتية، ويمكن انتقاء أحدها للتطبيق المناسب.

تملك بعض المضخمات العملياتية الصوتية مواصفات تنفرد بها عن المضخمات العملياتية التقليدية. مثلا المضخم العملياتي الشائع الاستخدام LM386 والذي يعمل على جهود منخفضة له ربح مثبت داخلياً على القيمة (20) ولكن يمكن زيادة الربح حتى (200) بوصل مقاومة ومكثف خارجيين بين الأرجل (1) و(8) والتي تسمى أرجل الربح (gain Lead) هذا المضخم مصمم لقيادة أحمال منخفضة المقاومة كسماعة 8Ω مثلاً ويعمل من مصدر جهد موجب وحيد يتراوح بين (+4V) و(+12V) وهو مجال مثالي للأجهزة التي تُغذى من بطاريات. المضخم LM383 هو مضخم صوتي آخر مصمم كمضخم استطاعة وهو عنصر عالي التيار (3.5A) ومصمم لقيادة حمل (4Ω)، مثلاً سماعة واحدة 4Ω أو سماعتين 8Ω موصولتين على

التفرع. يُزود هذا المضخم العملياتي بدارة حرارية للتوقيف عن العمل عند ارتفاع درجة الحرارة فوق مستوى معين كما أنه مزود بمبدد للحرارة راجع الفصل الحادي عشر، فصل المضخمات الصوتية (Audio amplifiers).



الشكل (7-22): دارات متكاملة لمضخمات استطاعة عملياتية.

7.7: مواصفات المضخم العملياتي

نسبة رفض النمط المشترك (CMRR)

تتكون إشارة دخل المضخم التفاضلي، في الحالة العامة، من مركبتين: إشارة النمط المشترك وإشارة النمط التفاضلي. وإشارة النمط المشترك هي القيمة الوسطى لإشارتي المدخلين، أما الإشارة التفاضلية (أو إشارة النمط التفاضلي) فهي الفرق بين إشارات المداخل. وفي الحالة المثالية يتأثر المضخم فقط بالإشارة التفاضلية، ولكن إشارة النمط المشترك تضخم بدرجة ما. تعرف نسبة إشارة النمط المشترك بأنها نسبة ربح جهد الإشارة التفاضلية إلى ربح جهد إشارة النمط المشترك وتعبر نسبة رفض النمط المشترك عن مدى جودة المضخم العملياتي في رفض الإشارات المطبقة في نفس الوقت على كلا المدخلين. كلما كانت قيمة CMRR أعلى فإن أداء المضخم العملياتي يكون أفضل.

مجال جهد الدخل التفاضلي

هو مجال الجهد الذي يمكن تطبيقه بين أطراف الدخل دون إجبار المضخم على العمل خارج المواصفات. وإذا تجاوزت المداخل هذا المجال، فإن ربح المضخم يمكن أن يتغير بشكل كبير.

ممانعة الدخل التفاضلي

هي الممانعة التي تقاس بين المدخل العاكس والمدخل غير العاكس للمضخم العملياتي.

جهد انزياح الدخل

يجب أن يكون جهد خرج المضخم العملياتي صفراً عندما تكون جهود المدخلين أصفاراً وذلك طبعاً من الناحية النظرية، ولكن في الواقع العملي وبسبب عدم التناظر في البنية الداخلية لدارة المضخم العملياتي ينشأ جهد في خرج المضخم العملياتي حتى لو كانت جهود المداخل أصفاراً. يُعرف جهد انزياح الدخل بأنه الجهد الذي يجب تطبيقه على أحد مداخل المضخم العملياتي لجعل جهد الخرج يساوي الصفر.

تيار انحياز الدخل

تعتبر ممانعات مداخل المضخم العملياتي لا نهائية وبالتالي فإن تيارات المداخل ستكون أصفاراً، ولكن الواقع العملي يؤكد أن المداخل تستجر تيارات صغيرة جداً من مرتبطة النانو أمبير (nA) إلى مرتبة البيكو أمبير (pA). يُعرف تيار انحياز الدخل

بأنه القيمة الوسطى لتياري المدخلين. يؤدي تيار انحياز الدخل إلى تشكل هبوط جهد على مقاومات التغذية العكسية أو مقاومات الاستقطاب أو مقاومة مصدر الإشارة، وهبوط الجهد هذا قد يؤدي بدوره إلى أخطاء في جهد الخرج. في المضخمات العملياتية المبنية على ترانزستورات JFET تكون تيارات الانحياز بالغة الصغر ولا تؤدي إلى انزياحات جهدية. أما في المضخمات العملياتية المبنية على ترانزستورات ثنائية القطبية فإن تيارات الانحياز من مرتبة الـ (nA) ويمكن أن تؤدي إلى مشاكل. توصل مقاومة بين المدخل غير العاكس والأرض لتقليل تأثير تيارات الانحياز على الانزياح في جهد الخرج وسيتم شرح آلية ذلك لاحقاً.

تيار انزياح الدخل

هو الفرق بين تيارات المداخل عندما يكون الخرج صفراً، ولكن ماذا يعني ذلك؟

إنّ مداخل المضخم العملياتي تستجر (تسحب) تيارات تسريب مختلفة حتى لو طبق على المدخلين نفس الجهد ويحدث ذلك بسبب وجود فارق بسيط في المقاومة لدارات المدخلين ويحدث ذلك أثناء عملية التصنيع ولذلك تمر تيارات مختلفة في المدخلين حتى لو تم وصل المدخلين إلى نفس الجهد، ويؤدي اختلاف تيارات المداخل إلى انزياح جهد الخرج. توجد أرجل للمضخم العملياتي توصل إلى مقسم جهد ويضبط مقسم الجهد كي يصحح تيار الانزياح وسيتم شرح كيفية حدوث ذلك لاحقاً.

ربح الجهد

يتراوح ربح الجهد للمضخم العملياتي بين (10^4) و(10^6) (أو بين 80 و120dB) ويُعبر عن الربح بالديسيبل (dB) اعتماداً على العلاقة:

$$A[dB] = 20Log_{10}(Av)$$

ينخفض ربح المضخم العملياتي إلى الواحد (1) عند تردد يسمى تردد الربح الواحدي Unity gain frequency F_T وتتراوح القيمة النموذجية لهذا التردد بين (1) و10MHz. وذلك نتيجة لاستجابة البنية الداخلية للمضخم العملياتي للترددات العالية.

تأرجح جهد الخرج

ويعني التأرجح الأعظمي لجهد الخرج حول الصفر والذي يمكن الحصول عليه دون أن يطرأ على الإشارة أي تشويه أو تحديد أو قص.

معدل التباطؤ

ويمثل المعدل الأعظمي لتغير جهد خرج المضخم العملياتي مع الزمن. إن محدودية تغير جهد الخرج مع الزمن تنتج عن مكثفات التعويض الداخلي أو الخارجي والتي تؤدي إلى إبطاء تغيرات جهد الخرج بالنسبة لتغيرات جهد الدخل (تأخير انتشار) وعند العمل على ترددات عالية يصبح مقدار معدل التباطؤ للمضخم العملياتي أكثر جدية. تبلغ قيمة معدل التباطؤ للمضخم العملياتي 741 الشائع الاستخدام 0.5V/µs وهي قيمة صغيرة نسبياً عند مقارنتها مع معد التباطؤ للمضخم العملياتي HA2539 والبالغة 600V/µs.

تيار التغذية

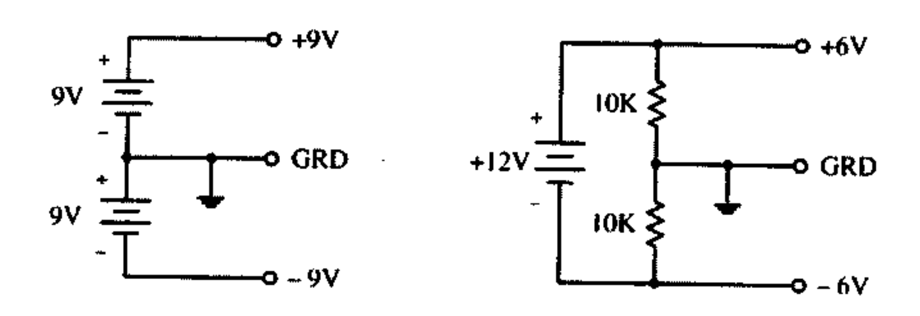
ويمثل هذا التيار قيمة التيار اللازم لتشغيل المضخم العملياتي في حالة عدم وجود حمل في الخرج وبجهد خرج يساوي الصفر ويستجر هذا التيار طبعاً من مصدر التغذية المستمر. يبين الجدول (7-1) عينة من جدول مواصفات المضخمات العملياتية.

الجدول (7-1): عينة من جدول مواصفات مضخمات عملياتية.

نوع المضخم العملياتي	جهد التغذية الكلي		تيار التغذية (mA)	جهد الانزياح		التيار		معدل التباطؤ نموذجي (V/μs)	F_T نموذجي (MHz)	CMRR Min (dB)	الربح الأصفري	تيار الخرج قيمة عظمى (mA)
	MAX (V)	Min (V)		نموذجي (mV)	أعظمي (mV)	استقطاب (nA)	انزياح (nA)					
ثنائي القطبية 741C	10	36	2.8	2	6	500	200	0.5	1.2	70	86	20
MOSFET CA3420A	2	22	1	2	5	0.005	0.004	0.5	0.5	60	86	2
JFET LF411	10	36	3.4	0.8	2	0.2	0.1	15	4	70	88	30
ثنائي القطبية عالي الدقة LM10	1	45	0.4	0.3	2	20	0.7	0.12	0.1	93	102	20

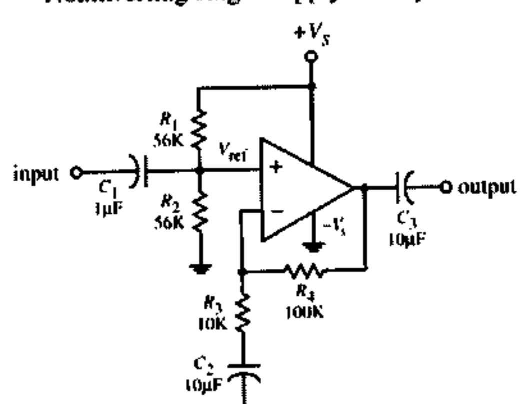
8.7 تغذية المضخمات العملياتية

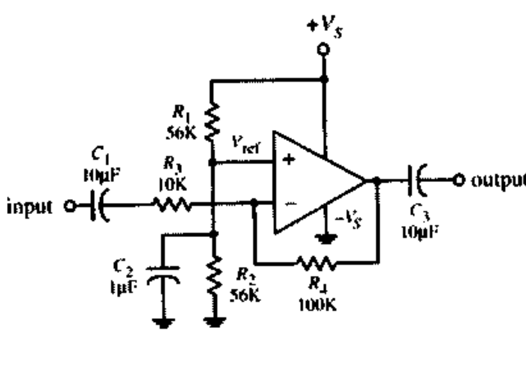
تحتاج أغلب تطبيقات المضخمات العملياتية إلى تغذية المضخم العملياتي بجهدي تغذية متعاكسي القطبية. تُعطى في الفصل العاشر دارة مصدر تغذية تعطي جهود 15v± وتعمل على محول ذي تفريعة في طرفه الثانوي (نقطة وسطى). عند استخدام البطاريات لتغذية المضخمات العملياتية يمكن استخدام إحدى الدارات المبينة في الشكل (7-23). من غير المرغوب غالباً أن يتم تجزئة مصدر التغذية (أي الحصول من بطارية مثلاً على جهدين سالب وموجب)، وخاصة في التطبيقات التي تغذى من بطاريات صغيرة، وقد يبدو لك أن الحل هو تغذية المضخم العملياتي من مصدر تغذية موجب وحيد، ولكن ذلك سوف يؤدي إلى قص الخرج عندما يكون الدخل سالباً (بفرض أن المضخم غير عاكس) وهذا يجعل المضخمات المغذاة من مصدر واحد غير مناسبة للتطبيقات المتناوبة، يمكن تجنب قص إشارة الخرج عند تغذية المضخم العملياتي من مصدر جهد موجب وحيد عن طريق وصل جهد مستمر عبر مقسم جهد إلى أحد مداخله، لأن ذلك يؤدي إلى إزاحة مستمرة بمستوى معين في الخرج. إزاحة المستوى في الدخل والخرج تقاس دوماً بالنسبة للأرض (أي بالنسبة للقطب السالب للبطارية).



الشكل (23.7)

عند ظهور مستوى إزاحة موجب في خرج المضخم العملياتي، فإن إشارة الخرج المتناوبة تتأرجح حول مستوى الإزاحة، وإذا كان المضخم غير عاكس فإن جهد الخرج سوف ينخفض عن مستوى الإزاحة في نصف الدور السالب لإشارة الدخل (بفرض أن إشارة الدخل جيبية مثلاً) ولكن جهد الخرج لا يصبح سالباً أبداً، وذلك بفرض أن مستوى الإزاحة مناسب وأن مطال إشارة الدخل ليس كبيراً جداً، وإلا فإن إشارة الخرج سوف تُقص. تستخدم مكثفات لربط إشارة الدخل مع المضخم ولربط الحمل مع خرج المضخم. تبين الدارات المعطاة في الشكل (7-24) مضخمات عاكسة وغير عاكسة ذات ربط متناوب (مصممة للتطبيقات الصوتية) وتستخدم في هذه الدارات مضخمات تقليدية تُغذى من مصدر تغذية وحيد.





الشكل (7-24): مضخمات مغذاة من مصدر تغذية وحيد.

يُضبط جهد الإزاحة في دارة المضخم غير العاكس بواسطة (R_1) و(R_2) على قيمة تساوي نصف جهد التغذية، وذلك للسماح بتأرجح أعظمي متناظر في الخرج. C_1 وR_2 وC_3 وR_{Load} تعمل كمكثفات ربط وترشيح تحجب المركبات المستمرة (dc) غير المرغوبة وكذلك الترددات المنخفضة. تحسب C_1 وC_3 من المعادلات:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi R_1 F_{3dB}}$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi R_{Load} F_{3dB}}$$

F_{3dB}: هو تردد القطع (cutoff frequency) (راجع الفصلين الثامن والحادي عشر).

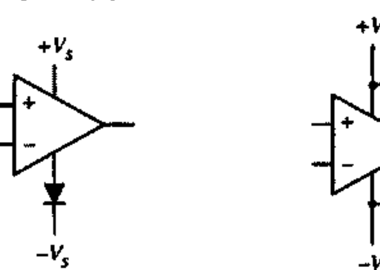
عند استخدام مضخمات عملياتية تقليدية وتغذيتها من مصدر وحيد يجب التأكد من البقاء دوماً ضمن معدلات جهود التغذية الأصغرية وعدم تجاوز التأرجحات الأعظمية المسموحة للجهد في الخرج وكذلك العمل ضمن المجال الأعظمي للدخل في النمط المشترك.

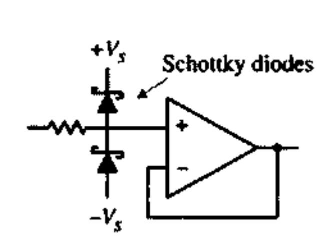
9.7: بعض الملاحظات العملية

ننبه هنا من باب التحذير إلى عدم عكس أطراف تغذية المضخم العملياتي أي عدم تطبيق جهد تغذية سالب على الطرف الذي يجب أن يوصل مع جهد تغذية موجب وبالعكس لأن ذلك قد يؤدي إلى انهيار المضخم العملياتي ولتجنب ذلك يوصل ديود بين طرف المضخم العملياتي الذي يوصل مع سالب التغذية وبين القطب السالب للتغذية كما في الشكل اليساري من (7-25).

- توصل أسلاك التوصيل بين أرجل التغذية في المضخم ومصادر التغذية بشكل مباشر وبحيث تكون أقصر ما يمكن، ويساعد ذلك على منع حدوث الاهتزازات غير المرغوبة ويقلل من تأثير الضجيج على الخرج.
- توصل مكثفات تمرير جانبي بين أرجل وصل التغذية في المضخم والأرض لتقليل تغيرات جهود التغذية، لأن تغيرات جهود التغذية تؤثر على عمل المضخم (انظر الشكل (7-25) في الوسط). وتتراوح قيم المكثفات المستخدمة بين 0.1µF و1µF.

Reverse-polarity protection Oscillation prevention Destructive latchup protection





الشكل (7-25).

تتعرض المضخمات العملياتية ثنائية القطبية والحقلية FET إلى أخطار إذا تجاوزت إشارة الدخل قيم جهود التغذية الموجبة والسالبة، فمثلاً إذا أصبح جهد الدخل أكثر إيجابية من (+V_s +0.7V)، أو أكثر سلبية من (-V_s-0.7V) فإن التيارات في الدارة الداخلية للمضخم العملياتي يمكن أن تمر باتجاهات معاكسة مؤدية إلى قصر مصادر التغذية وتدمر العنصر ولتجنب حدوث ذلك من الضروري منع إشارات الدخل من تجاوز قيم مصادر التغذية لأن ذلك له تأثيرات ضارة جداً على المضخم العملياتي فإذا وصلت إشارة كهربائية إلى دارة مضخم عملياتي وكانت الدارة غير مغذاة، وفي لحظة وصل التغذية قد تنهار دارة المضخم العملياتي فوراً لأن الإشارة في لحظة ما بعد وصل التغذية قد تكون أكبر من جهد التغذية. لمنع حدوث ذلك يتم تحديد إشارات الدخل بواسطة ديودات ويفضل في هذه الحالة استخدام ديودات سريعة بجهد أمامي منخفض من نوع شوتكي (Schottky diodes)، انظر الشكل (7-25).

يمكن أيضاً استخدام مقاومة محددة للتيار لمنع تيار الديود من تجاوز القيم المسموحة. قد تجلب دارة الحماية الأخيرة بعض الإشكالات لأن تيارات تسريب الديودات قد تؤدي إلى زيادة الخطأ، ولمزيد من المعلومات يُنصح بمراجعة نشرات معطيات الجهات الصانعة.

10.7: تعويض جهود الإنزياح وتياراته

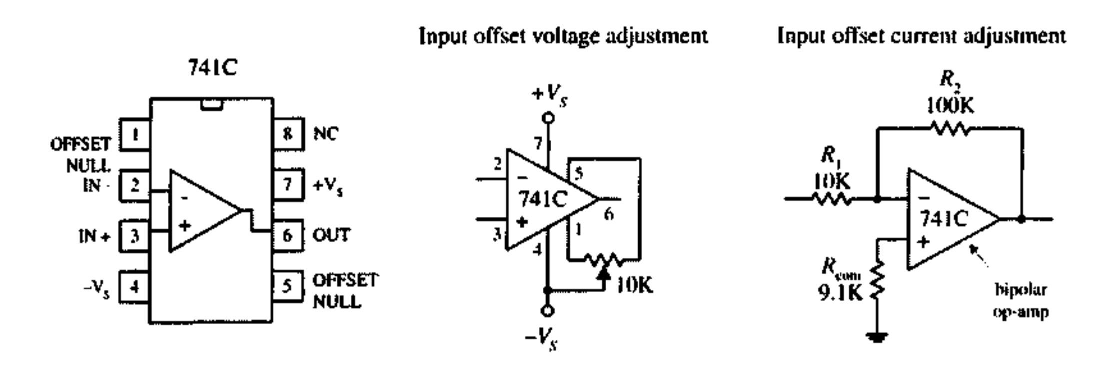
يجب أن يكون جهد خرج المضخم العملياتي من الناحية النظرية صفراً عندما تكون جهود مداخله أصفاراً. ولكن عدم التوازن في دارة المضخم يؤدي إلى ظهور جهد في خرج المضخم العملياتي (في مجال الميكروفولت أو الميللي فولت) عندما تكون جهود مداخله أصفاراً. وكما ذكرنا فإن انزياح جهد الدخل (input offset voltage) هو مقدار الجهد الذي يجب تطبيقه بين أحد المداخل والأرض لجعل جهد الخرج صفراً، طبعاً عندما يكون المدخل الآخر مؤرضاً، وقد نوقش ذلك سابقاً. من أجل جعل جهد الانزياح في الخرج صفراً تزود الجهات الصانعة المضخمات العملياتية بأرجل (طرفين) تسمى أرجل تصفير الانزياح (Offset null terminals) ويوصل مقسم جهد بين الطرفين المخصصين لذلك وتوصل الذراع المتحركة لمقسم الجهد إلى مصدر التغذية السالب، كما في الشكل (7-26) ومن أجل ضمان تمركز جهد الخرج حول قيمة الصفر يوصل المدخلان مع بعضهما وتوصل معهما إشارة دخل فإذا وصل الخرج إلى الإشباع فإن إزاحة الدخل تحتاج إلى ضبط. افصل الإشارة عن المدخلين وأوصل المدخلين مع الأرض واضبط المقاومة المتغيرة حتى يصبح جهد الخرج مساوياً للصفر.

في الدارة اليمنية من الشكل (7-26) تلاحظ وجود مقاومة موصولة بين المدخل غير العاكس والأرض، ما وظيفة هذه المقاومة؟ تستخدم هذه المقاومة لتعويض أخطاء جهد الخرج الناتجة عن هبوطات الجهد التي تتشكل على المقاومات (R_1) و(R_2) بسبب تيار الانحياز (bias Current). وكما ذكرنا سابقاً تكون تيارات الانحياز في المضخمات العملياتية ثنائية القطبية أكبر من تيارات الاستقطاب في المضخمات العملياتية الحقلية (FET Op Amps)، ولذلك تكون أخطاء الجهد في دارات الـ

FET Op Amps صغيرة جداً ويمكن إهمالها ولا حاجة لمقاومة التعويض. ولكن هذا لا ينطبق على المضخمات العملياتية ثنائية القطبية وتكون مقاومة التعويض ضرورية. يؤدي تيار الاستقطاب في دارة المضخم العاكس (وبفرض عدم وجود مقاومة تعويض) إلى تشكل هبوط جهد على المقاومات R_1 وR_2 يساوي:

$V = I_{bias}.(R_1 || R_2)$

ويكبر هذا الجهد بعامل يساوي ($-R_2/R_1$). ولتعويض تأثير الجهد V على الخرج توصل مقاومة تعويض تساوي ($R_1 || R_2$) بين المدخل غير العاكس والأرض، لأن هذه المقاومة تعوِّض انزياح جهد الخرج الناتج عن تيار الإزاحة.



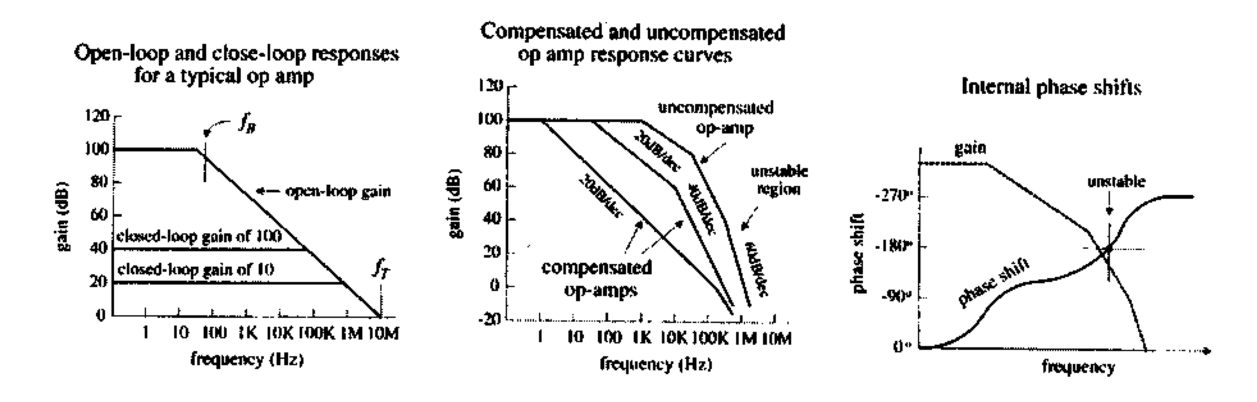
الشكل (7-26): تعويض جهود وتيارات الإنزياح.

11.7: التعويض الترددي

يبلغ ربح الحلقة المفتوحة للمضخم العملياتي قيمة تتراوح عادة بين (10^4) و(10^8) أو بين (80 و120dB) ولكن عند تردد منخفض معين يُرمز له بالرمز F_B ويسمى breakover frequency ينخفض الربح بمقدار (3dB) أو ينخفض إلى النسبة 70.7% من قيمة ربح الحلقة المفتوحة (الربح الأعظمي) ومع ازدياد التردد ينخفض الربح أكثر حتى يصل إلى قيمة تساوي الواحد (1) (أو OdB) عند تردد يسمى تردد الربح الواحدي (unity gain frequency F_T). القيمة النموذجية لـ F_T للمضخمات العملياتية هي حوالي 1MHz وتُعطى في نشرة معطيات المضخم العملياتي (أو في جدول مواصفاته)، انظر الشكل (7-27) اليساري، وانخفاض الربح بزيادة التردد يشبه سلوك مرشح تمرير منخفض ناتج عن طبيعة الدارة الداخلية للمضخم العملياتي.

عند استخدام تغذية عكسية في دارة المضخم يزداد عرض الحزمة (لأن الربح ينخفض) وتصبح الاستجابة الترددية المطالية للمضخم العملياتي مسطحة ضمن مجال ترددي أوسع، كما في الشكل الموضح في أقصى اليسار (7-27). إن المضخمات العملياتية التي تبدي انخفاضاً في الربح أكبر من 60dB/decade عند F_T هي مضخمات غير مستقرة بسبب انزياحات الصفحة الناتجة عن السلوك المشابه لسلوك مرشح تمرير منخفض للدارة الداخلية للمضخم العملياتي. إذا وصلت إزاحات الصفحة إلى 180° عند تردد ما وكان الربح عند هذا التردد أكبر من الواحد فإن التغذية العكسية السالبة تنقلب إلى موجبة، انظر الأشكال الموجودة في وسط الشكل (7-27) ويمينه، وقد ينشأ اهتزاز غير مرغوب في دارة المضخم. يستخدم التعويض الترددي (Frequency Compensation) لمنع حدوث الاهتزاز، ويمكن تعويض المضخمات العملياتية غير المعوضة بوصل مقاومة ومكثف بين أطراف (أرجل) التعويض الترددي في المضخم العملياتي.

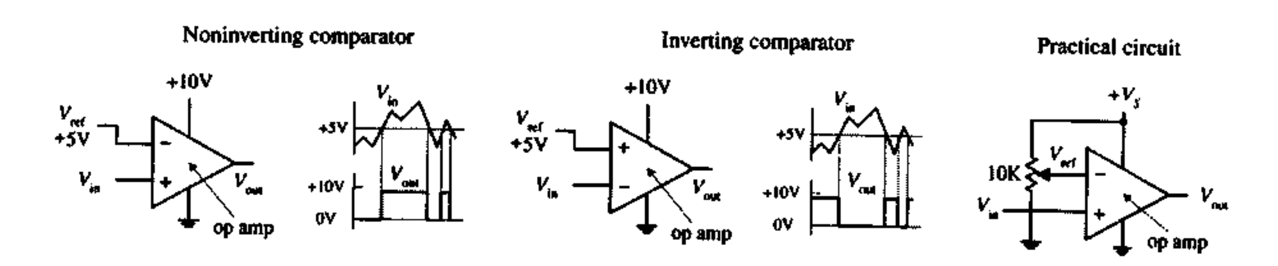
تؤثر دارة التعويض، وخاصة المكثف على شكل منحني الاستجابة. تزودك الشركات الصانعة بمنحنيات الاستجابة وبقيم عناصر التعويض الخارجية اللازمة. قد تكون أسهل طريقة لتجنب التعامل مع مشكلة التعويض الترددي في المضخم العملياتي هي شراء مضخم عملياتي معوَّض داخلياً.



الشكل (7-27): الاستجابات الترددية للمضخم العملياتي.

12.7: المقارنات

من المرغوب في العديد من الحالات معرفة متى تزيد إشارة ما عن مستوى محدد مسبقاً أو معرفة أية واحدة من إشارتين أكبر من الأخرى. يمكن تصميم دارات بسيطة بواسطة المضخم العملياتي للقيام بهذا العمل، كما في الشكل (7-28). ينتقل جهد الخرج في دارة المقارن غير العاكس (Noninverting Comparator) من الصفر إلى قيمة عالية (high) تساوي تقريبا جهد الإشباع الموجب عندما يصبح جهد الدخل أكبر من الجهد المرجعي المطبق على المدخل العاكس للمقارن، أما في دارة المقارن العاكس فإن الخرج ينتقل إلى الصفر عندما يكون جهد الدخل أكبر من الجهد المرجعي المطبق على المدخل غير العاكس وطبعاً يكون الخرج على حالة (high) إذا كان الجهد المرجعي أكبر من جهد الدخل. يُستخدم مقسم جهد في الدارة اليمينية لضبط الجهد المرجعي على القيمة المرغوبة.

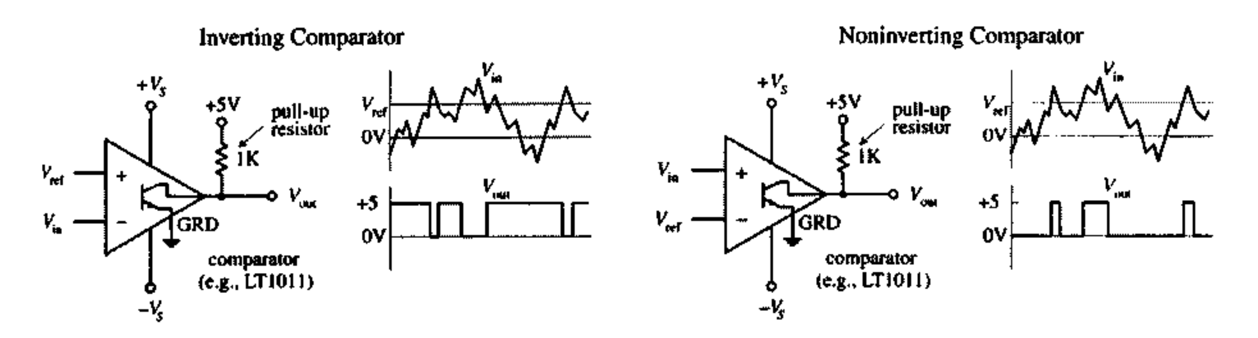


الشكل (7-28): دارات مقارنات عاكسة وغير عاكسة.

توجد طريقة أكثر استخداماً لمقارنة إشارتين أو جهدين وهي استخدام دارات متكاملة خاصة تسمى مقارنات (Comparator ICs)، والمقارن له مثل المضخم العملياتي مدخل عاكس ومدخل غير عاكس وطرف خرج وأطراف لوصل جهد التغذية ورمزه يشبه رمز المضخم العملياتي أيضاً، إلا أن المقارنات غير معوَّضة ترددياً ولذلك لا يمكن استخدامها كمضخمات خطية، والمقارنات لا تستخدم التغذية العكسية السالبة نهائياً (بل وكما سنرى تستخدم التغذية العكسية الموجبة). إذا استخدمت التغذية العكسية السالبة في دارة مقارن فإن مميزة خرجه ستكون غير مستقرة. تصمم المقارنات بشكل خاص من أجل التبديل السريع في الخرج من حالة إلى حالة وتمتاز بعامل أو معدَّل تباطؤ أكبر بكثير من المضخمات العملياتية العادية كما أن تأخير الانتشار عبرها أصغر مما هو عليه في المضخمات العملياتية العادية. هناك فرق آخر بين المقارنات والمضخمات العملياتية يتعلق بدارة الخرج فدارة الخرج في المضخمات العملياتية هي مرحلة دفع- جذب أما دارة الخرج في المقارن فهي عبارة عن ترانزستور داخلي مجمعه موصول مع الخرج وباعثه مؤرض. عندما يكون جهد

الطرف غير العاكس في المقارن أقل إيجابية من جهد الطرف العاكس فإن ترانزستور الخرج ينتقل إلى حالة (On) مؤرضاً الخرج، أما عندما نجعل الطرف غير العاكس أكثر إيجابية من الطرف العاكس فإن ترانزستور الخرج يكون في حالة قطع (Off)، ولكي نجعل جهد خرج المقارن في حالة high (عندما يكون $V_- < V_+$) توصل مقاومة شد (Pull-up resistor) خارجية بين خرج المقارن وموجب التغذية.

تعمل مقاومة الشد في دارة المقارن كعمل مقاومة المجمع في دارة المضخم الترانزستوري. يجب أن تكون قيمة مقاومة الشد الخارجية كبيرة بقدر كاف لتجنب التبديد الزائد للاستطاعة، وكذلك يجب أن تكون صغيرة إلى درجة كافية لتأمين تيار القيادة اللازم لدارة الحمل التي توصل إلى خرج المقارن. تتراوح القيم النموذجية لمقاومات الشد بين بضعة مئات وبضعة آلاف الأومات. يبين الشكل (7-29) دارات مقارنات عاكسة وغير عاكسة بمقاومة شد في الخرج. يتأرجح خرج الدارتين حسب حالات المداخل بين (0V) و(+5V).



الشكل (7-29): دارات مقارنات عاكسة وغير عاكسة بمقاومات شد.

تستخدم المقارنات عادة في عمليات التحويل التشابهي إلى رقمي، وقد يكون التطبيق النموذجي للمقارن هو وصل حساس مغناطيسي أو ديود ضوئي إلى دخل مقارن (مع وجود جهد مرجعي على المدخل الآخر) وجعل الحساس يقود خرج المقارن إلى حالات (Low) أو (high) المناسبة لقيادة دارات منطقية. سنناقش التحويل التشابهي الرقمي (Analog to digital conversion) بتفصيل أكثر في الفصل الثاني عشر.

13.7: مقارنات بعروة

توجد مشكلة أساسية في دارات المقارنات الموجودة في دارة الشكل (7-29) وذلك عند وجود إشارة دخل بطيئة التغيرات ومستوى هذه الإشارة قريب من الجهد المرجعي لأن الخرج في مثل هذه الحالة سوف يقفز ويعود بشكل متكرر بين حالتي الجهد العالي والمنخفض، وفي أغلب الحالات تكون هذه الاستجابة غير المرضية مكروهة.

وبدلاً من ذلك نقبل بمنطقة من الإشارة محصورة بين مستويين للجهد نهمل فيها التغيرات في الإشارة ولتحقيق كل ذلك تستخدم تغذية عكسية موجبة في دارة المقارن من أجل تأمين عروة hysteresis تحدد مستويين مختلفين لجهود العتبة أو لنقاط القدح. سوف نبين من خلال الفقرات التالية كيفية عمل العروة في دارة المقارن.

1.13.7: مقارن عاكس بعروة

تُعطى دارة المقارن العاكس في الشكل (7-30) وتؤمن التغذية العكسية الموجبة عبر المقاومة (R_3). للمقارن جهدا عتبة أو نقطتا قدح. ينتج جهد العتبة من حقيقة أن الجهد المرجعي المطبق على المدخل غير العاكس للمضخم العملياتي يختلف في

الحالة التي يكون فيها V_{out} = (+15V) عن الحالة التي يكون فيها الخرج في حالة (Low) أو صفر فولت (0V) والاختلاف ناتج طبعاً عن الاختلاف في قيم تيارات التغذية العكسية. نرمز لجهد العتبة عندما يكون الخرج high بالرمز (Vref1) ولجهد العتبة عندما يكون الخرج في حالة (Low) بالرمز (Vref2). لنفترض الآن أن الخرج على حالة high والترانزستور في حالة (off) وأن $V_{in}>V_{ref1}$. كي ينتقل الخرج إلى حالة high، يجب أن يكون V_{in} أكبر من (V_{ref1})، ولكن ما قيمة (V_{ref1})؟ والجواب هو أن V_{ref1} هو الجهد المرجعي المطبق على المدخل غير العاكس للمقارن عندما يكون ترانزستور الخرج (Off) وجهد الخرج (+15V)، ومن أجل حساب (V_{ref1}) يمكن الاستعانة بالدراة الموجودة في أسفل الشكل (7-30) اليساري.

$$V_{ref1} = \frac{+V_S R_2}{(R_1 \| R_3) + R_2} = \frac{+V_S R_2 (R_1 + R_2)}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

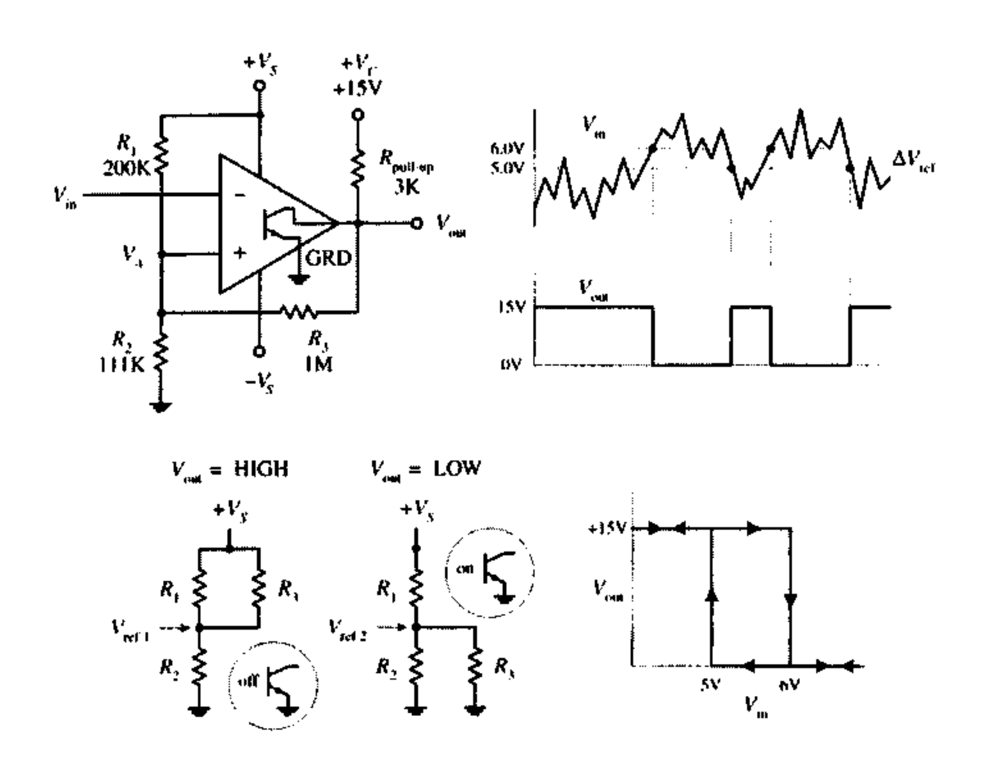
إذا كان $V_{in}>V_{ref1}$ عندما يكون الخرج في حالة high، فإن الخرج ينتقل فجأة إلى حالة (Low) وينتقل الترانزستور إلى حالة (On). الآن أصبح الخرج على وضع (Low) ويكون الجهد المرجعي هو (V_{ref2}) ويمكن استخدام الدارة اليمنية الموجودة أسفل الشكل (7-10) لإيجاد (V_{ref2}).

$$V_{ref2} = \frac{+V_S (R_2 \| R_3)}{R_1 + (R_2 \| R_3)} = \frac{+V_S R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

عندما ينخفض جهد الخرج إلى (V_{ref2}) أو أخفض منه فإن الخرج ينتقل فجأة إلى حالة (high). يسمى الفرق بين الجهود المرجعية باسم مجال العروة (hysteresis voltage) ويرمز له بالرمز ΔV_{ref}:

$$\Delta V_{ref} = V_{ref1} - V_{ref2} = \frac{+V_S R_1 R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

وسنجرب هذه النظرية الآن بمثال تصميمي.



الشكل (7-30): مقارن عاكس بعروة.

صمم دارة مقارن له $V_{ref1}=+6V$، $V_{ref2}=+5V$ وجهد التغذية المتوفر للمقارن هو $V_{CC}=+15V$ بفرض أن حمل المقارن هو ($R_L = 100k\Omega$).

الحل: نختار مقاومة الشد الخارجية من القاعدة:

$R_{pull-up} < R_{Load}$

كما نختار المقاومة R_3 بحيث تتحقق المتراجحة:

$R_3 > R_{pull-up}$

لماذا؟ لأن التحميل الأكبر للمقاومة $R_{pull-up}$ (أي القيم الأخفض لكل من R_3 وR_{Load}) يخفض جهد الخرج الأعظمي ويخفض بذلك مقدار العروة بتخفيض قيمة (V_{ref1}). نختار ($R_{pull-up} = 3k\Omega$) و$R_3 = 1M\Omega$ ومن المعادلات السابقة نحصل على مجموعة العلاقات التالية:

$$\frac{\Delta V_{ref}}{V_{ref2}} = n \qquad (1)$$

$$R_1 = nR_3 \qquad (2)$$

$$R_2 = \frac{R_1 \| R_3}{(+V_S / V_{ref1}) - 1} \qquad (3)$$

من المعادلة (1) تحسب (n):

$$n = \frac{6V - 5V}{5V} = \frac{1V}{5V} = 0.2$$

ن

من المعادلة (2) تحسب R_1:

$$R_1 = 0.2(R_3)=0.2(1M\Omega)=200k\Omega$$

ومن المعادلة (3) تحسب المقاومة (R_3):

$$R_3 = \frac{166k\Omega}{(\frac{15V}{6V} - 1)} = 111k\Omega$$

وهذه هي قيم عناصر دارة الشكل (7-30).

2.13.7: مقارن غير عاكس بعروة

يحتاج هذا المقارن لمقاومتين خارجيتين لكي تحدث العروة (ويمكن أن تحتاج مقاومات إضافية إذا كنت تريد استخدام مقسم جهد من أجل ضبط الجهد المرجعي. ولكن هذه المقاومات لن يكون لها دور مباشر في تشكيل جهد العروة). إن الطرف الذي تطبق عليه إشارة الدخل هو نفسه الذي يحدث عنده انزياح العتبة- نتيجة للتغذية العكسية الموجبة. يُزاح جهد العتبة المطبق على الطرف غير العاكس بمقدار يساوي تقريباً الجهد المرجعي عند تغير جهد الخرج من ($+V_C$) إلى ($0V$) وعلى سبيل المثال افترض أن (V_{in}) في حالة مستوى منخفض بقدر كاف لجعل V_{out} على حالة (Low)، ولكي ينتقل الخرج إلى حالة high فإن V_{in} يجب أن يرتفع إلى جهد قدح نسميه (V_{in1}) ويمكن إيجاد (V_{in1}) بسهولة باستخدام دارة المقاومات المبينة في أقصى يسار وأسفل الشكل (7-31).

$$V_{in1} = \frac{V_{ref}(R_1 + R_2)}{R_2}$$

وحالما ينتقل V_{out} إلى حالة high، فإن الجهد على الطرف غير العاكس يُزاح إلى قيمة أكبر من V_{ref} بمقدار:

$$\Delta V+ = V_{in} + \frac{(V_{CC} - V_{in1})R_1}{R_1 + R_2}$$

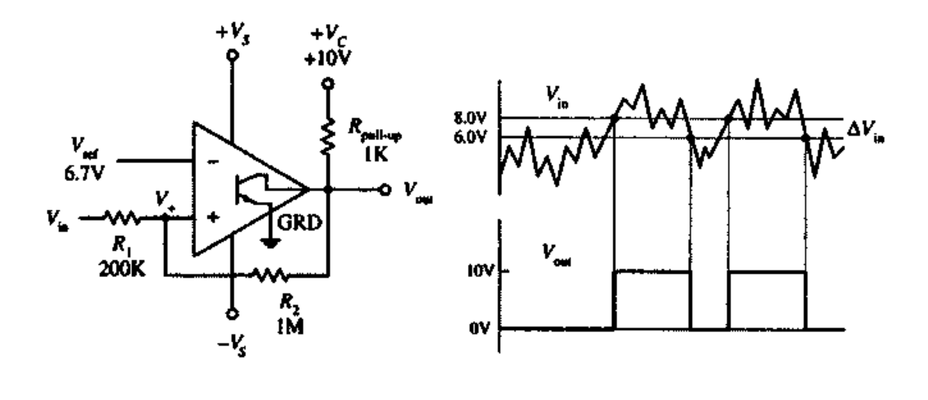
ولجعل المقارن ينتقل عائداً إلى حالة (Low) يجب أن ينخفض V_{in} إلى ما دون ΔV_+، وهذا يعني أن جهد الدخل المطبق يجب أن ينخفض إلى ما دون نقطة القدح الثانية (V_{in2}):

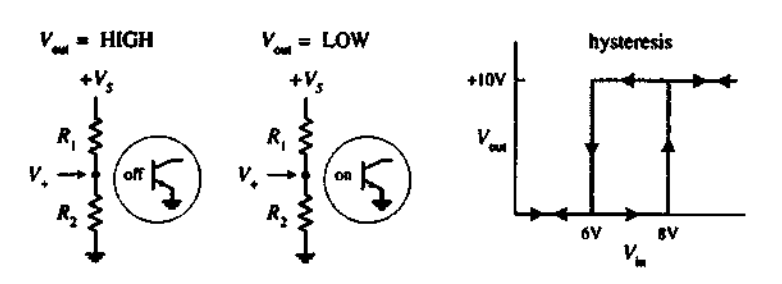
$$V_{in2} = \frac{V_{ref}(R_1 + R_2) - V_{CC}R_1}{R_2}$$

والعروة بين V_{in1} وV_{in2}:

$$\Delta V_{in} = V_{in1} - V_{in2} = \frac{V_{CC}R_1}{R_2}$$

مثال: احسب V_{ref}، $R_{pull-up}$، R_2 وR_1 في دارة مقارن الشكل (7-31) بحيث يكون $V_{in1} = 8V$، $V_{in2} = 6V$، وذلك باعتبار أنّ $+V_C = +10V$ ومقاومة الحمل $100k\Omega$.





الشكل (7-31): دارة مقارن عاكس بعروة.

الحل: نختار

$R_{pull-up} < R_{Load}$

$R_2 > R_{pull-up}$

وذلك من أجل تخفيض تأثيرات التحميل إلى الحد الأدنى. اختر:

$R_{pull-up} = 1k\Omega$

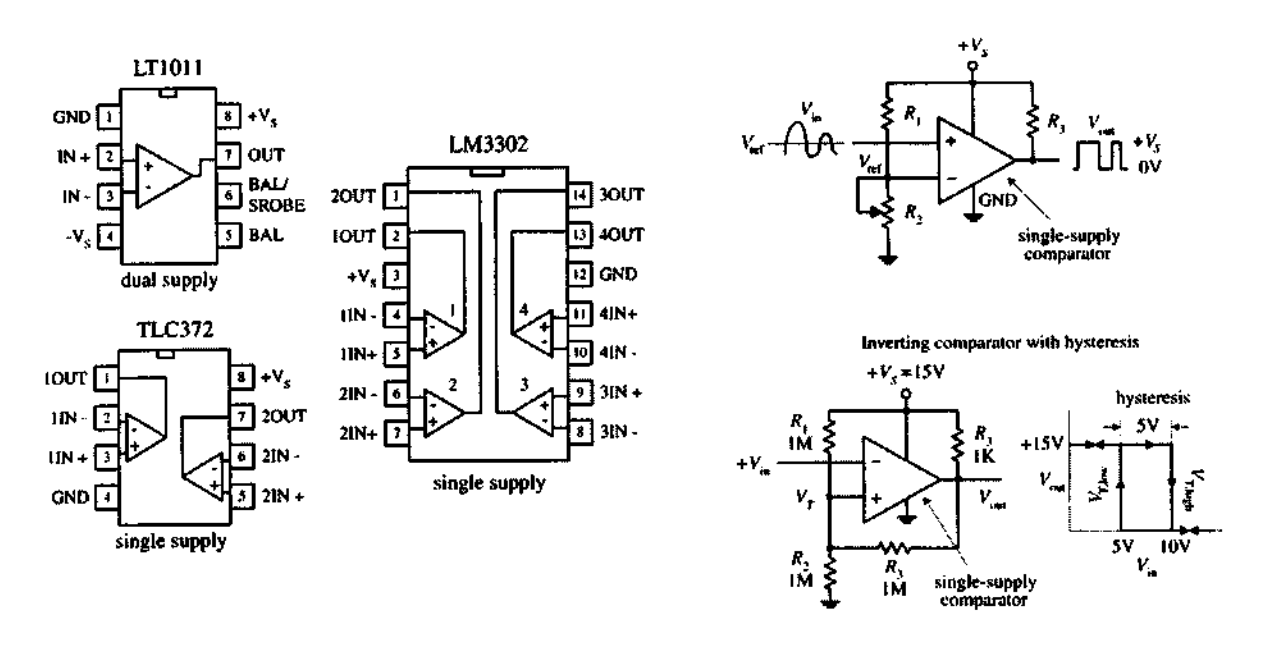
$R_2 = 1M\Omega$

عندها ومن المعادلات السابقة نوجد R_1 وV_{ref}:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\Delta V_{in}}{V_C} = \frac{10-8}{10} = 0.20$$
$$R_1 = 0.2R_2 = 0.2(1M\Omega) = 200k\Omega$$
$$V_{ref} = \frac{V_{in1}}{1+\frac{R_1}{R_2}} = \frac{8V}{1+0.2} = 6.7V$$

14.7: استخدم المقارنات ذات مصدر التغذية الوحيد

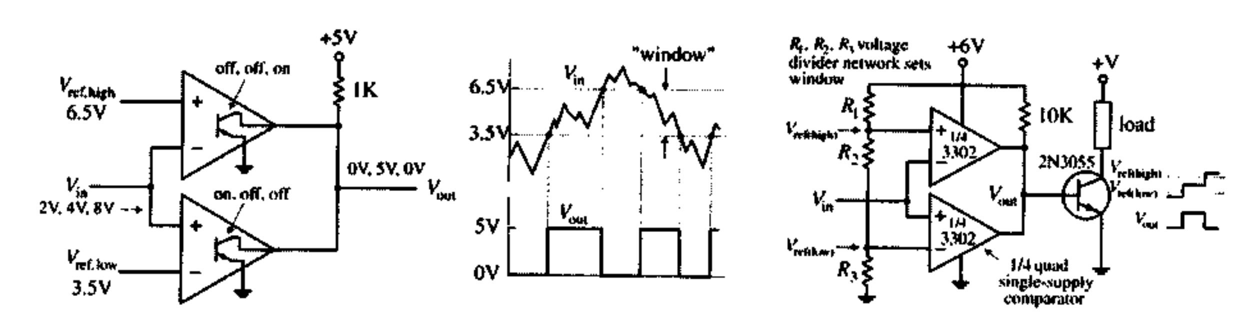
تتوفر مقارنات تغذى من مصدري جهد تغذية، ومقارنات تغذى من مصدر تغذية وحيد، وتوصل رجل باعث ترانزستور الخرج مع طرفية التغذية السالبة مع بعض إلى الأرض داخلياً في المقارنات التي تتغذى من مصدر وحيد. في المقارنات التي تغذى من مصدرين توجد رجل خاصة للأرضي ورجل لمصدر التغذية السالب وأخرى لمصدر التغذية الموجب. يبين الشكل (7-32) نماذج من دارات متكاملة لمقارنات تغذى من مصدر وحيد والدارة المتكاملة LT1011 التي تغذى من مصدرين.



الشكل (7-32): نماذج من دارات متكاملة لمقارنات تغذى من مصدر واحد ومن مصدرين.

15.7 مقارن النافذة

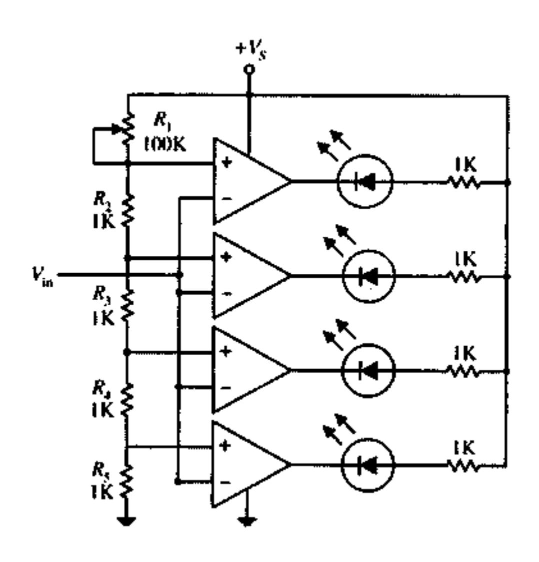
مقارن النافذة هو دارة مفيدة جداً تغير وضع خرجها عندما يكون جهد دخلها واقعاً بين قيمتين محددتين تسميان جهوداً مرجعية (Low) و(high). تسمى المنطقة بين هذين المستويين بالنافذة (Window). يبين الشكل (7-33) مقارن نافذة بسيطاً مكوناً من مقارنين (يمكن أيضاً استخدام مضخمين عملياتيين). تقع النافذة في الدارة اليسارية بين الجهود (V_{ref}, Low = 3.5V) و(V_{ref}, high = 6.5V). إذا كان V_{in} أقل من (+3.5V) فإن خرج المقارن السفلي يكون مؤرضاً أما خرج المقارن العلوي فيكون عائماً. تحتاج هذه الدارة إلى أرضي واحد لجعل (V_{out} = 0). إذا كان (V_{in}) أكبر من (+6.5V) يكون خرج المقارن العلوي مؤرضاً أما خرج المقارن السفلي فيكون عائماً وطبعاً يكون (V_{out} = 0V). يُستخدم مقسم جهد في الدارة اليمينية لضبط الجهود المرجعية.



الشكل (7-33): مقارن نافذة.

16.7: مبين مستوى الجهد

يمكن بناء مبين جهد باستخدام عدد من المقارنات التي تشترك مع بعضها بدخل واحد ولكن الجهد المرجعي لكل مقارن يختلف عن الجهود المرجعية للمقارنات الأخرى، كما في الشكل (7-34)، وفي هذه الدارة يزداد الجهد المرجعي للمقارنات كلما ارتفعت في الدارة باتجاه الأعلى (بسبب استخدام شبكة مقاومات كمقسمات جهد). عندما يزداد جهد الدخل ويتجاوز بقليل أصغر جهد مرجعي في الدارة وهو الجهد المطبق على المقارن السفلي فإن خرج هذا المقارن ينتقل إلى حالة (Low) ويضيء الديود المصدر للضوء (LED) الموصول معه وهكذا تضاء باقي الديودات بالتسلسل نحو الأعلى بالاستمرار في زيادة الجهد المطبق على الدخل. تستخدم مقاومة متغيرة (R_1) لضبط كافة الجهود المرجعية.



الشكل (7-34): مبين مستوى جهد.

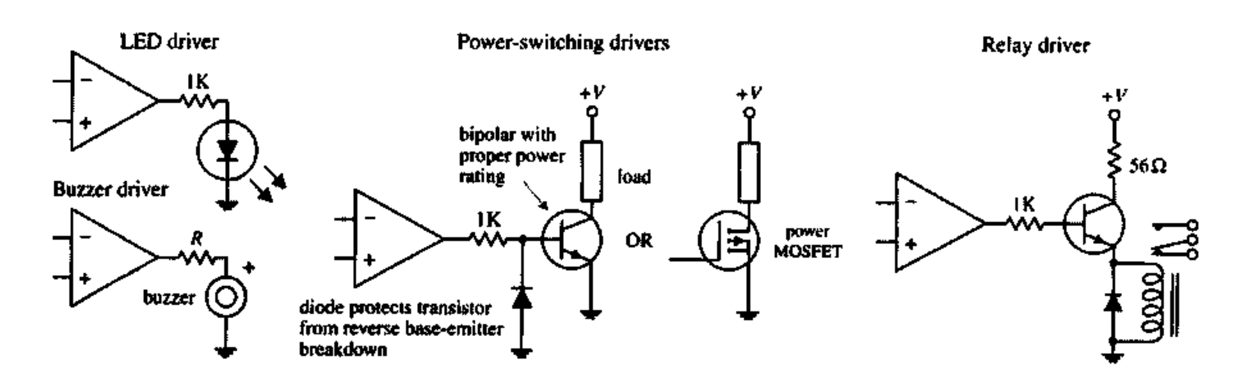
17.7: تطبيقات

مضخمات عملياتية لقيادة أحمال (On) أو Off

يبين الشكل (7-35) مجموعة من الدارات البسيطة التي تستخدم فيها المضخمات العملياتية لقيادة أحمال إلى وضع (On) أي عمل أو (Off) توقف، وهذه الدارات هي:

- دارة قيادة ديود مصدر للضوء (LED driver).
- دارة قيادة رنان (طنان) (Buzzer driver).
- دارة قيادة مفتاح إلكتروني استطاعي (Power Switching driver).
- دارة قيادة حاكمة.

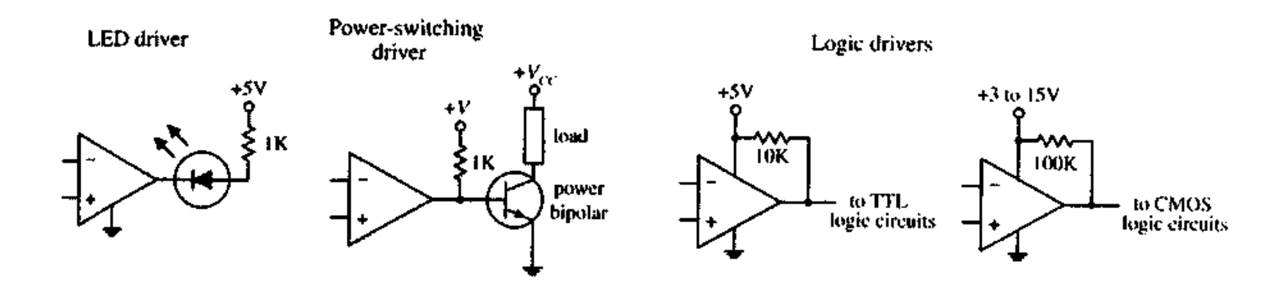
مبادئ عمل هذه الدارات بسيطة جداً ولذلك لا داعي لشرحها هنا.



الشكل (7-35): المضخمات عملياتية في قيادة الأحمال (on)، أو (off).

استخدام خرج المقارنات في قيادة الاحمال

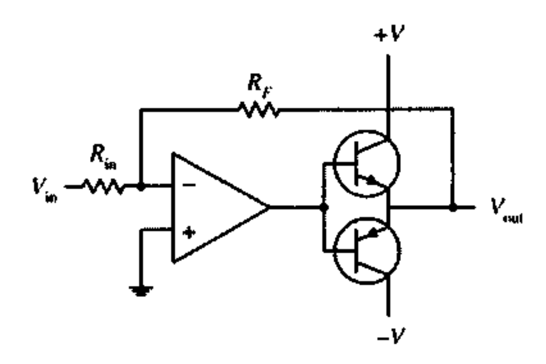
يبين الشكل (7-36) مجموعة من الدارات البسيطة التي تستخدم المقارن لقيادة إما ديود مصدر للضوء LED، أو لقيادة مفتاح ترانزستوري استطاعي يوصل تغذية حمل ويفصلها، أو لقيادة دارات منطقية من عائلة TTL أو من عائلة CMOS.



الشكل (7-36): استخدام خرج المقارنات في القيادة.

مقوي استطاعة باستخدام مضخم عملياتي

هناك حالات نحتاج فيها لزيادة استطاعة خرج إشارة متناوبة مع الحفاظ على مطال الإشارة (التأرجح بين القمة والقمة). يمكن تضخيم الاستطاعة مع المحافظة على المطال باستخدام مضخم دفع جذب يعمل على ترانزستورات متعاكسة القطبية ومضخم عملياتي كما في الشكل (7-37). عند العمل على سرعات عالية نحتاج إلى مقاومات استقطاب إضافية وإلى مكثفات إضافية لتقليل تشويه العبور (Crossover distortion)، أما عند العمل على سرعات منخفضة فإن التغذية العكسية السالبة تساعد كثيراً في إزالة تشويه العبور.



الشكل (37.7): مقوي استطاعة لإشارات متناوبة باستخدام مضخم عملياتي.

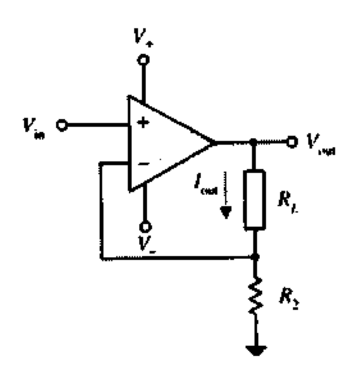
مبدل جهد إلى تيار

تبين دارة الشكل (7-38) منبع تيار بسيطاً وتتعلق قيمة تيار خرج هذا المنبع بجهد الدخل المطبق على المدخل غير العاكس. تُعطى علاقات جهد الخرج وتيار الحمل بالمعادلات التالية:

$$V_{out} = \frac{R_L + R_2}{R_2} V_{in}$$

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L + R_2} = \frac{V_{in}}{R_2}$$

يمكن ضبط V_{in} بواسطة مقسم جُهد.



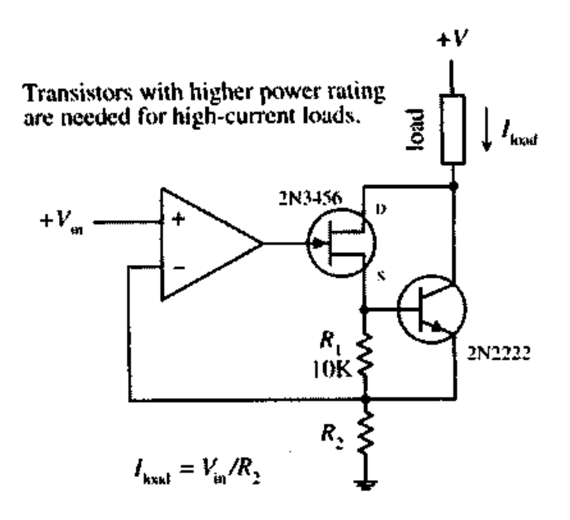
الشكل (7-38): دارة مبدل جهد إلى تيار.

منبع تيار دقيق

يُستخدم في هذه الدارة ترانزستور FET لقيادة ترانزستور خرج نوع (npn) لامتصاص التيار المار عبر الحمل وهذه الدارة بعكس الدارة السابقة أقل تحسساً لتغيرات جهد الخرج. يساعد استخدام ترانزستور JFET في الحصول على تيار استقطاب صفري (عند استخدام ترانزستور ثنائي القطبية فقط في مرحلة الخرج فإن تياراً سوف يمر في قاعدته). تعتبر هذه الدارة ذات دقة مناسبة للتطبيقات التي تحتاج تيارات أكبر من $I_{DS(on)}$ وجهد دخلها أكبر من (0) فولت. عند الحاجة لتيارات عالية يستبدل الترانزستور الحقلي والترانزستور العادي بزوج دارلنغتون (Darlington Pair) وذلك بشرط أن لا يكون تيار قاعدته كبيراً، لأنه إذا كان كذلك فإنه يتسبب بحدوث أخطاء. يحسب تيار الحمل من العلاقة:

$$I_{Load} = \frac{V_{in}}{R_2}$$

تستخدم المقاومة (R_2) من أجل الضبط. وقد تحتاج الدارة إلى تعويض إضافي ويتعلق ذلك بردِّية الحمل (Load reactance) وببارمترات الترانزستور. يجب استخدام ترانزستورات بمعدل استطاعة كافٍ لتحمل تيار الحمل المطلوب.



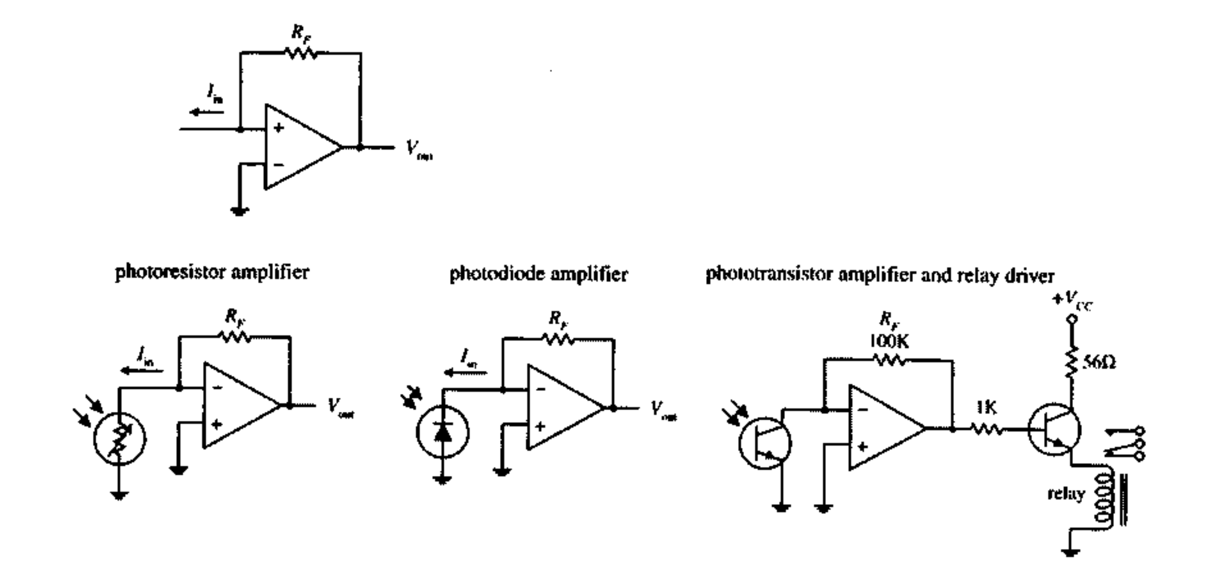
الشكل (7-39): دارة منبع تيار دقيق.

مبدل تيار إلى جهد

تقوم الدارة المعطاة في الشكل (7-40) بتحويل التيار إلى جُهد، وتساعد مقاومة التغذية العكسية على تكوين جهد على المدخل العاكس للمضخم وتتحكم بتأرجح الخرج. يُعطى جهد خرج هذه الدارة بالعلاقة:

$V_{out} = I_{in}.R_F$

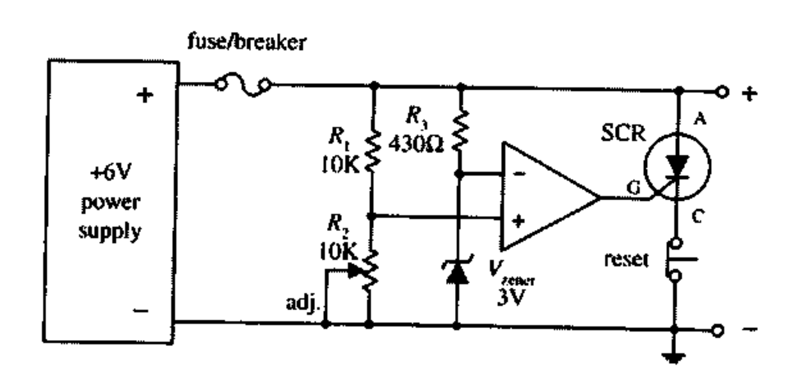
تستخدم الدارات المفعلة ضوئياً والموجودة في الأسفل هذا المبدأ للحصول على جهد خرج يتناسب مع تيار الحساس الضوئي.



الشكل (7-40): مبدلات تيار إلى جهد.

دارة حماية من الجهد الزائد

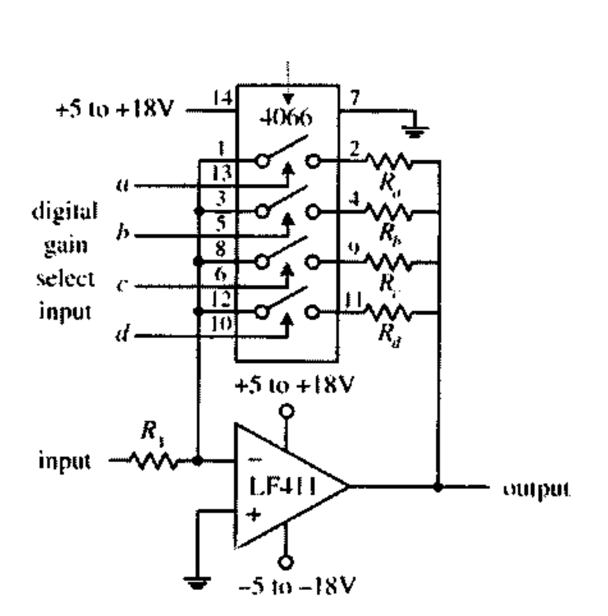
تستخدم هذه الدارة كدارة حماية من الجهد الزائد وهي ذات استجابة سريعة وتقوم الدارة بحماية الحمل من قفزات الجهد التي تظهر لأسباب مختلفة على خطوط التغذية. بفرض أن مصدر التغذية يعمل بشكل طبيعي ويعطي جهد خرج يساوي (6V)، في هذه الحالة يضبط جهد المدخل غير العاكس للمضخم العملياتي على (+3V) وبواسطة ديود زينر (3V) يتم تأمين جهد ثابت للمدخل العاكس للمضخم العملياتي. في هذه الحالة يكون الفرق بين جهدي المدخلين يساوي الصفر وجهد الخرج أيضاً يساوي الصفر (المضخم العملياتي يعمل كمقارن)، وعندما يكون جهد خرج المقارن صفراً يكون الثايرستور في حالة قطع ولا يمر تيار من المصعد إلى المهبط فالأرض. لنفترض الآن أن قفزة جهدية مفاجئة قد حدثت في الجهد عندها يزداد الجهد على المدخل غير العاكس للمضخم العملياتي أما جهد المدخل العاكس فيبقى ثابتاً بسبب وجود الزينر (3V) ولذلك (بما أن $V_- < V_+$) فإن خرج المقارن ينتقل إلى حالة high وينقل الثايرستور إلى حالة (on) ويمر كل التيار عبر الثيارستور إلى الأرض بدلاً من مروره عبر الحمل وبنتيجة ذلك يحترق الفيوز وتتم حماية الحمل. يوجد في الدارة مفتاح (reset) لقطع الثايرستور وإعادته يدوياً إلى حالة عدم التمرير.



الشكل (7-41): دارة حماية من الجهد الزائد.

مضخم عملياتي بربح قابل للبرمجة

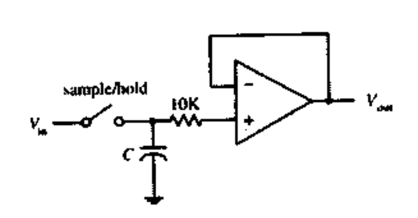
الدارة المبينة في الشكل (7-42) هي دارة مضخم عاكس، وفيه يتم اختيار مقاومة التغذية العكسية (وبالتالي الربح gain) بواسطة مفتاح متحكم به رقمياً (مثلاً بواسطة الدارة المتكاملة CMOS 4066). في الدارة إذا تم مثلاً وصل النقطة (a) إلى جهد (+5V) أو (+18V) فإن المفتاح الموجود ضمن الدارة المتكاملة يوصل النقاط (1) و(2) وتصبح المقاومة R_a موصولة بين خرج المضخم العملياتي ومدخله العاكس والربح يساوي ($-R_a/R_1$) وذلك إذا كانت النقاط (b)، و(c)، و(d) كلها موصولة إلى صفر. أما إذا تم وصل النقاط (a) و(b) إلى جهد (+5V) أو (+18V) فإن المقاومات R_a وR_b تصبح موصولة على التوازي بين خرج المضخم ودخله العاكس والربح يساوي $[-(R_a//R_b)/R_1]$. وهكذا تلاحظ أنه يمكن تغيير الربح بتغيير المقاومة الموصولة بين الخرج والمدخل العاكس ويتم ذلك رقمياً. تسمى الدارة CMOS4066 باسم دارة مفاتيح ثنائية وسوف تدرس المفاتيح الثنائية بتفصيل أكثر في الفصل الثاني عشر.

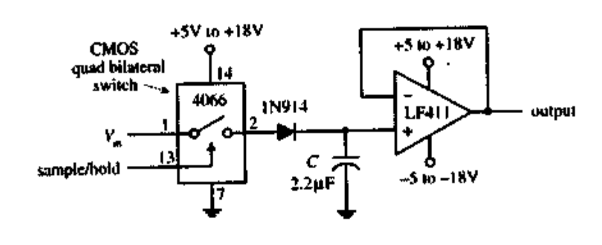


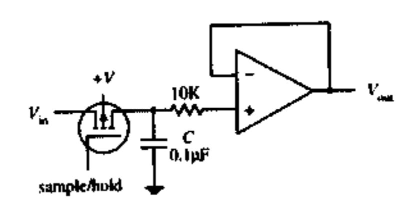
الشكل (7-42): دارة مضخم عملياتي بربح قابل للبرمجة.

دارات أخذ عينات ومسكها

تستخدم دارات أخذ العينات ومسكها لأخذ عينات من إشارة تشابهية ومسكها تمهيداً لمعالجتها أو تحويلها إلى إشارة رقمية. في الدارة الأولى يستخدم المفتاح للتحكم بعملية أخذ العينة ومسكها وتبدأ عملية أخذ العينة مع إغلاق المفتاح وتنتهي عند إعادة المفتاح إلى وضع (Open) وجهد الإشارة لحظة فتح المفتاح هو الجهد الذي تشحن إليه المكثفة (c) وهو جهد دخل المضخم العملياتي غير العاكس الذي يعمل كمضخم بربح واحدي وبذلك يكون جهد خرج المضخم العملياتي مساوياً جهد المكثف (جهد الدخل) دون أن يفرغ المكثف لأن تيار المدخل غير العاكس للمضخم العملياتي مهمل. يتعلق زمن الاحتفاظ بالعينة (الجهد المخزون بالمكثف) بالتيار الذي يتسرب من المكثف ولتخفيض تيار التسريب يستخدم مضخم عملياتي حقلي (FET OP Amp). في الدارة الثانية والثالثة يستعاض عن المفتاح اليدوي الموجود في الدارة الأولى (مفتاح أخذ العينة ومسكها) بمفاتيح تقاد كهربائياً، فالدارة الموجودة في الوسط تستخدم مفتاحاً ثنائياً أما الدارة السفلية فيستخدم فيها ترانزستور MOSFET. المكثفات المناسبة للاستخدام في دارة أخذ العينات ومسكها هي مكثفات التيفلون، أو البولي إيتيلين، أو البوليكربونات والمكثفات ذات العازل من نوع البولي كربونات.



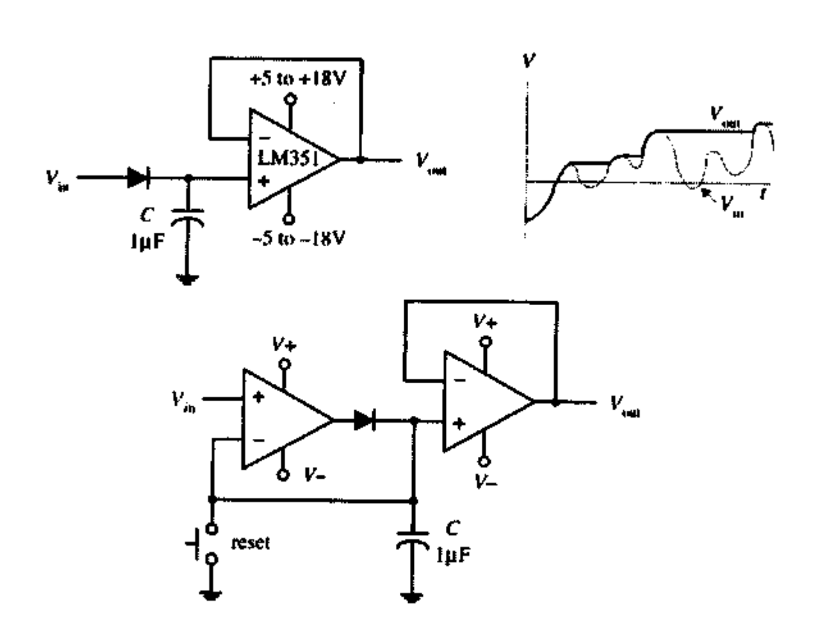




الشكل (7-43): دارات أخذ عينات ومسكها.

كواشف القمة

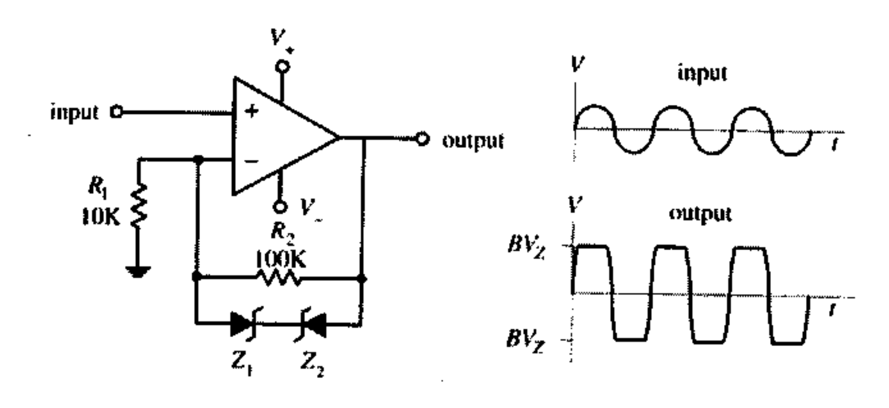
الدارات المبينة في الشكل (7-44) هي دارات كواشف قمة، وجهد خرج هذه الدارات يلاحق القيم العظمى لإشارة الدخل ويخزنها في المكثف (C). يعمل المضخم العملياتي في الدارة العليا كمضخم عازل (buffer) وجهد خرج المضخم العملياتي يساوي جهد المدخل غير العاكس (جهد المكثف) دون أن يفرغ المكثف، أما الديود فيمنع المكثف من التفريغ إذا انخفض جهد الدخل إلى قيمة أدنى من الجهد الذي شحن إليه المكثف. الدارة الثانية هي دارة عملية لكاشف القمة والمضخم الإضافي يجعل الدارة أكثر حساسية لجهد الدخل إذ يتم تعويض هبوط الجهد (0.6V) على الديود في الدارة الأولى وذلك بإعادة جهد المكثف كجهد تغذية عكسية إلى المدخل غير العاكس للمضخم العملياتي الأول وتعمل دارة المضخم العملياتي الأول كمقوم فعال. يوجد في الدارة مفتاح لتصفير الكاشف (عند ضغط المفتاح تفرغ المكثفة). يستخدم ترانزستور FET غالباً في دارات كواشف القمة بدلاً من الديود كما تُستخدم بوابة حقلية (FET gate) كمفتاح تصفير. إن تخفيض قيمة المكثف (C) تؤمن استجابات أسرع للتغيرات في جهد الدخل (V_{in}).



الشكل (7-44): كواشف قمة.

مضخم قص (قاص) غير عاكس

تعمل دارة مضخم الشكل (7-45) على قص القيم الموجبة والسالبة من الإشارة ويحدث القص بسبب دارة التغذية العكسية التي تحوي على زينرين موصولين على التسلسل والتعاكس فعندما يكون جهد الخرج أكبر من جهد انهيار الزينر، فإن الزينر ينهار ويحدد جهد الخرج على قيمة تساوي جهد الزينر. عند إزالة أحد الزينرين من الدارة يحدث القص فقط في أحد الاتجاهات (إما الموجب، أو السالب حسب الزينر الذي تمت إزالته من الدارة. يمكن استخدام هذه الدارة لمنع حدوث التحميل الزائد في المضخمات الصوتية، كما يمكن أن تستخدم كمبدل موجة جيبية إلى موجة مربعة.



الشكل (7-45): مضخم قص غير عاكس.

المقومات الفعالة

يمكن استخدام الديود العادي المعروف لتقويم الإشارات المتناوبة وأثناء تمرير الديود يهبط عليه جهد قدره (0.6V) وقد لا يكون هبوط الجهد هذا كبيراً بالنسبة لجهد الخرج، ولكن المشكلة هي في تقويم الجهود ذات المطالات الأخفض من (0.6V) والتي لا يتحسس بها الديود العادي نهائياً. لحل هذه المشكلة يتم استخدام دارة مقوم فعال كالمقوم المبين في الشكل (7-46).

تعمل هذه الدارة كمقوم مثالي (ideal rectifier) حيث يقوِّم الإشارات ذات المطالات الأعلى بقليل من الصفر. ولفهم آلية عمل هذه الدارة نفرض أن (V_{in})<0 (موجب) عندها يمر تيار (I) في الاتجاه المبين على الدارة المرسومة تحت دارة المقوم. بما أن (V_+) مؤرض والدارة تحوي تغذية عكسية فإنه بالإمكان اعتبار ($V_- = V_+ = 0$) وحسب قانون كيرشوف للجهد نجد أن:

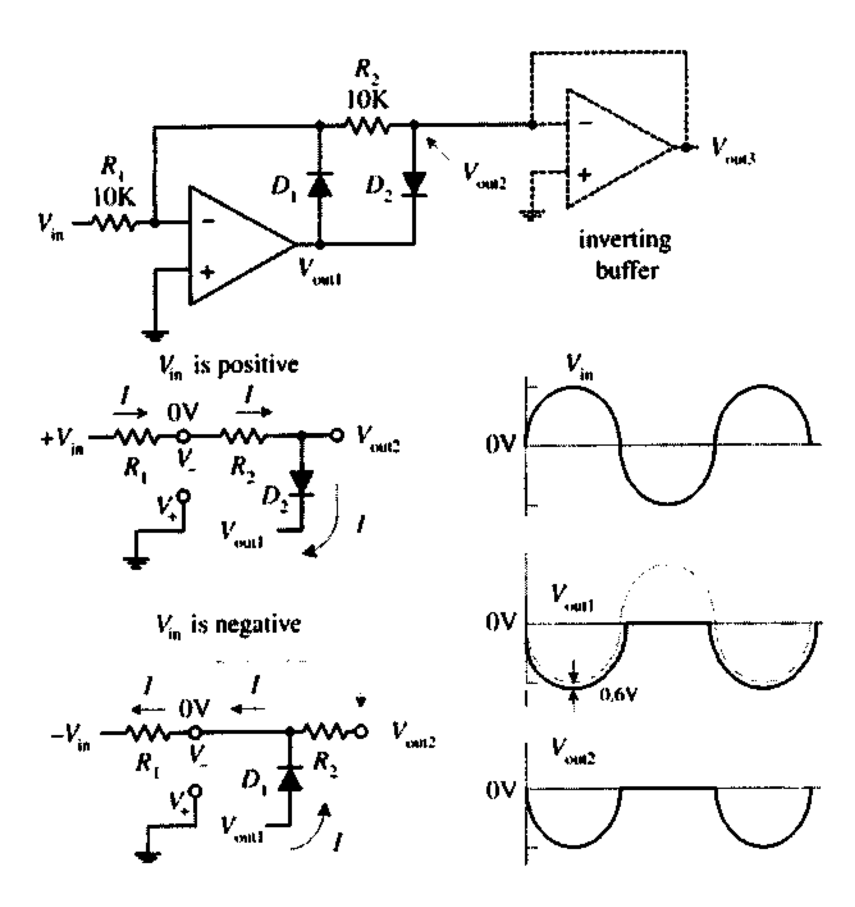
$$0V - IR_2 - 0.6V - V_{out1} = 0$$

$$V_{out1} = 0V - \frac{V_{in}R_2}{R_1} - 0.6V = -V_{in} - 0.6V$$

$$V_{out2} = V_{out1} + 0.6V = -V_{in}$$

$$V_{out3} = V_{out2} = -V_{in}$$

لاحظ أن جهد الخرج مساو بالقيمة لجهد الدخل ولا يوجد انخفاض في الجهد قدره(0.6V) ولكن الخرج معكوس مقارنة مع الدخل. إذا كان (V_{in}) سالباً يكون (D_1) في حالة (On) ويمر تيار عبر D_1 بحيث يصبح ($V_-=0$) ولذلك لا يمر تيار عبر المقاومة (R_2) ويكون جهد الخرج ($V_{out2} = 0$) وكذلك ($V_{out3} = 0$). تستخدم مرحلة المضخم العازل بعد المقوم لجعل مقاومة الخرج منخفضة ولعزل المقوِّم عن الحمل. إذا أردت الحصول على تطابق صفحي بين الخرج والدخل (عند كون الخرج ≠ 0) عليك استخدام دارة مضخم عاكس بربح يساوي الواحد بعد دارة المقوم.



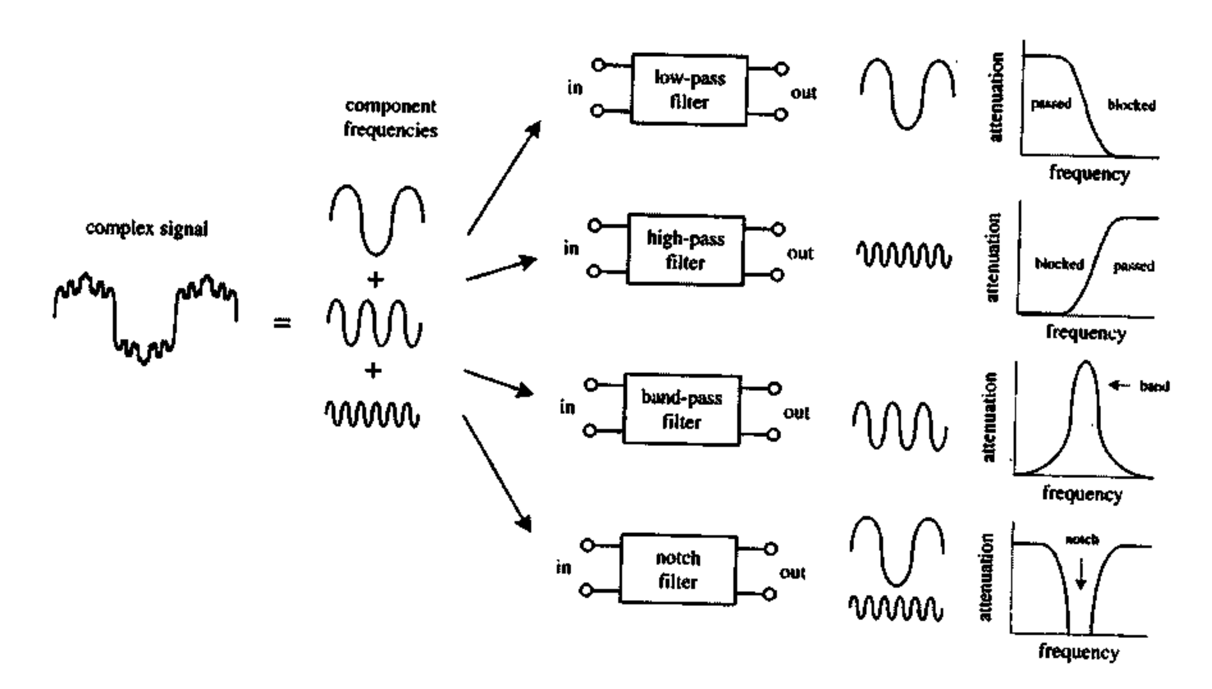
الشكل (7-46): دارة مقوم فعال.

8



المرشحات

المرشح هو دارة قادرة على تمرير مجال محدد من الترددات وحجز المجالات الترددية الأخرى. الأنواع الأربعة الأساسية للمرشحات، كما رأيت في الفصل الثاني هي: مرشحات التمرير المنخفض، ومرشحات التمرير العالي، ومرشحات تمرير الحزمة، ومرشحات حجز الحزمة. يمرر مرشح التمرير المنخفض المركبات الترددية المنخفضة لإشارات الدخل، أما مرشح التمرير العالي فيمرر المركبات الترددية العالية. يمرر مرشح تمرير الحزمة مجالاً معيناً من الترددات متمركزاً حول تردد مركزي يُسمى تردد طنين المرشح (filter resonant frequency)، أما مرشح حجز الحزمة، فإنه يمرر كافة الترددات ماعدا حزمة معينة من الترددات المتمركزة حول تردد يُسمى تردد طنين المرشح.



الشكل (1.8): أصناف المرشحات واستجاباتها الترددية.

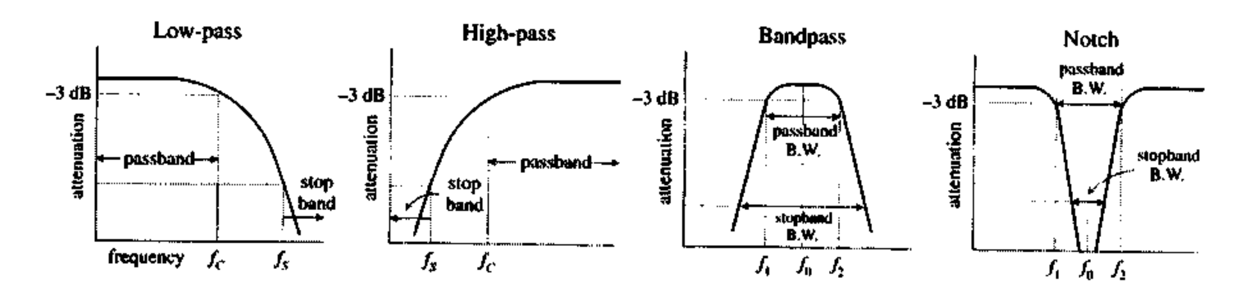
للمرشحات تطبيقات عديدة في الصناعات الإلكترونية فمثلاً تستخدم المرشحات في مصادر التغذية المستمرة (dc power supply)، وكذلك تستخدم المرشحات للتخلص من ترددات الضجيج العالية غير المرغوبة الموجودة على خطوط الجهد المتناوب (ac voltage). في مصادر الجهد المستمر المقوَّم تُستخدم عادة مرشحات تمرير منخفض من أجل تنعيم جهد الخرج المقوَّم والاقتراب به من الجهد المستمر. أما في الاتصالات الراديوية فإن المرشحات تسمح للمستمع بالتقاط الإشارة المطلوبة فقط وبكبت كل الإشارات الباقية وكذلك فإن المرشحات لها استخدامات عديدة في دارات الإرسال اللاسلكي. في الدارات الصوتية تستخدم دارات مرشحات تسمى شبكات العبور (crossover networks) لتوزيع الإشارات الصوتية إلى أجهزة إصدار الصوت speakers الخاصة بالترددات المنخفضة (woofers)، والترددات المتوسطة، والترددات العالية (tweeters)، ويمكن القول إن قائمة استخدامات المرشحات طويلة جداً ونكتفي هنا بهذا القدر من الأمثلة.

يُغطى في هذا الفصل نوعان من المرشحات هما المرشحات السلبيّة (passive filters)، والمرشحات الفعالة (active filters). تصمم المرشحات السلبيَّة باستخدام عناصر سلبية (كالمقاومات، والملفات، والمكثفات) وتستخدم المرشحات السلبيَّة في المجال الترددي من (100 Hz) وحتى (300 MHz) والتردد الحدي المنخفض (100 Hz) ناتج عن أن الملفات تصبح كبيرة جداً عند الترددات المنخفضة، أما إذا زاد التردد عن الحد العلوي لمجال عمل المرشحات السلبيّة فإن السعات الطفيلية بين لفات الملف وبين الأسلاك المتقاربة تصبح ذات تأثير كبير سلبي على عمل المرشح. عند تصميم مرشح سلبي باستجابة سريعة الانخفاض يزداد عدد مقاطع الدارة الحاوية على ملفات ومكثفات (تزداد درجة المرشح)، وبزيادة عدد العناصر الداخلة في تركيب المرشح للحصول على الاستجابة المرغوبة يزداد التخميد على عناصر المرشح ضمن حزمة التمرير. عند تصميم المرشحات السلبيَّة يجب أن تؤخذ ممانعات (impedances) الحمل ومصدر الإشارة بالاعتبار. تصمم المرشحات الفعالة باستخدام مضخمات عملياتية، ومقاومات ومكثفات ــ ولكن بدون استخدام ملفات. تستطيع المرشحات الفعالة التعامل مع ترددات منخفضة جداً تصل حتى (10 Hz)، كما أنها قادرة على تحقيق ربح إذا كان ذلك مطلوباً (وذلك بعكس المرشحات السلبية التي لا يمكن أن تحقق ربحاً).

يمكن تصميم دارات المرشحات الفعالة لتحقق استجابة مشابهة لاستجابة مرشحات LC، وهي أسهل من ناحية التصنيع ولا تحتاج إلى عناصر كبيرة الحجم، كما يمكن تحقيق ممانعات الدخل والخرج المطلوبة بغض النظر عن التردد. أحد أبرز سلبيات المرشحات الفعالة هو محدودية مجال التردد العالي الذي يمكن أن تعمل عليه فإذا زاد التردد عن حوالي 100 kHz تصبح المرشحات الفعالة غير موثوقة الأداء بسبب عرض حزمة المضخم العملياتي ومعدَّل التباطؤ (slew rate)، لذلك من الأفضل استخدام المرشحات السلبية في مجالات الترددات الراديوية والعالية.

1.8 أشياء يجب أن تعرفها قبل أن تبدأ بتصميم المرشحات

يستخدم منحني الاستجابة (response curve) لوصف سلوك المرشح، ومنحني الاستجابة هو الخط البياني لـ $\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)$ كتابع للتردد، انظر الشكل (2.8)، يمكن كما رأيت في الفصل الثاني التعبير عن النسبة (V_{out}/V_{in}) بالديسيبل (dB)، أما التردد فيمكن التعبير عنه بالتردد الزاوي (ω) مقدراً بالراديان على الثانية (rad/S) أو بالتردد التقليدي (f) المقدر بالهرتز (Hz)، والعلاقة بين (ω) و(f) هي ($\omega = 2\pi f$). يمكن أن تُرسم منحنيات استجابة المرشحات على ورق خطي ــ خطي (Linear-Linear)، وورق لوغارتمي ــ خطي (Log-Linear)، وورق لوغارتمي ــ لوغارتمي (Log-Log Paper). عند رسم الاستجابة على ورق خطي ــ لوغارتمي (المحور الأفقي محور لوغارتمي) والعمودي خطي، لا حاجة للتعبير عن النسبة (V_{out}/V_{in}) بالديسيبل (dB).



الشكل (2.8): منحنيات استجابة لكافة أنواع المرشحات.

فيما يلي نتعرف على بعض المصطلحات الشائعة التي تستخدم عند وصف استجابة المرشحات.

تردد الـ -3 dB (f_{3dB})

هو تردد إشارة الدخل الذي يجعل جهد خرج المرشح ينخفض بمقدار (-3 dB) بالنسبة لإشارة الدخل. تردد الـــ (-3 dB) يساوي تردد القطع، وعند هذا التردد تنخفض استطاعة الخرج إلى النصف بالنسبة لاستطاعة الدخل أو ينخفض جهد الخرج بمقدار $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$ بالنسبة لجهد الدخل. في مرشحات التمرير المنخفض والعالي يوجد فقط تردد (-3 dB) واحد، أما في مرشحات تمرير الحزمة وحجز الحزمة فهناك ترددا (-3 dB) يُرمز لهما عادة بـــ (f_1) و(f_2).

التردد المركزي (f_0)

عند رسم استجابة مرشح تمرير حزمة على ورق خطي (للمحور العمودي $\frac{V_{out}}{V_{in}}$) ولوغارتمي لمحور التردد، يكون منحني الاستجابة متناظراً هندسياً حول تردد طنين المرشح أو حول التردد المركزي. تُعطى العلاقة بين التردد المركزي (f_0) وترددات الـــ (-3 dB) بالمعادلة التالية:

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$$

في المرشحات ضيقة الحزمة التي تكون فيها ($f_2/f_1 < 1.1$) يقترب شكل الاستجابة من التناظر الحسابي، وفي هذه الحالة يكون (f_0) هو المتوسط الحسابي لترددات الـــ (-3 dB)، أي

$$f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

حزمة التمرير

هي المجال الترددي الذي لا ينخفض فيه جهد خرج المرشح أكثر من 3 dB بالمقارنة مع جهد الدخل.

حزمة المنع

هي المجال الترددي الممتد من (0) إلى تردد الـــ (-3dB) في مرشحات التمرير العالي، ومن تردد الـــ (-3dB) إلى اللانهاية في مرشحات التمرير المنخفض. توجد حزمتا منع في مرشح تمرير الحزمة، تمتد الأولى من (0) حتى (f_1) والثانية من (f_2) إلى اللانهاية (انظر الشكل 2.8)، أما في مرشح حجز الحزمة فإن حزمة المنع تقع بين (f_1) و(f_2).

عامل الجودة (Q)

هو نسبة التردد المركزي لمرشح تمرير حزمة إلى عرض حزمة الـــ -3 dB (-3 dB bandwidth) أو:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

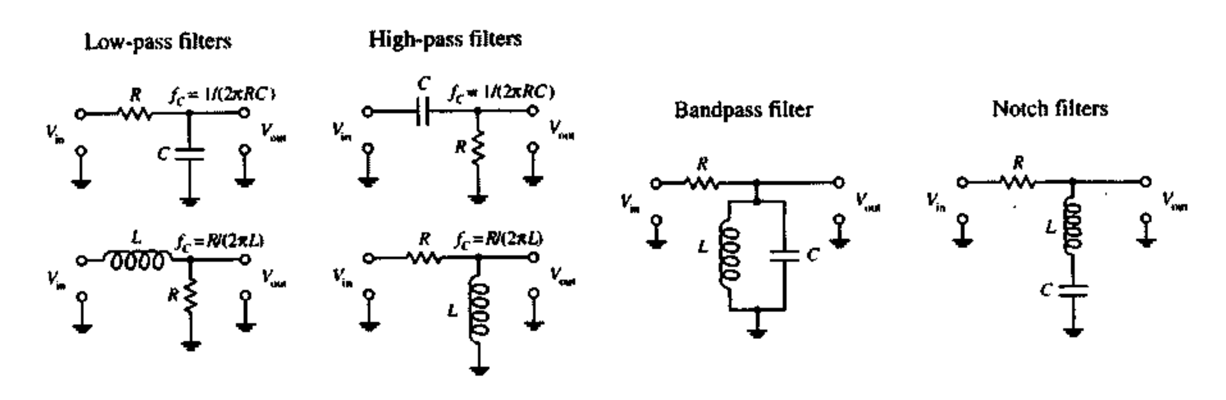
ويسمى المجال الترددي (f_2 - f_1) باسم عرض حزمة المرشح وذلك بفرض أن (f_1) و(f_2) هي ترددات الـ -3 dB للمرشح.
تُعرَّف (Q) لمرشح حجز الحزمة من العلاقة:

$$Q = \frac{f_2 - f_1}{f_0}$$

f_0: هو التردد المركزي ويسمى أيضاً التردد الصفري (null frequency).

2.8 المرشحات الأساسية

وجدت في الفصل الثاني أنه يمكن تشكيل دارات مرشحات تمرير منخفض، وتمرير عالٍ، وتمرير حزمة، وحجز حزمة باستخدام مكثفات وملفات ودارات طنين (LC) تسلسلية وتفرعية، ومقاومات أومية.
وفيما يلي مراجعة سريعة للأنواع الأساسية للمرشحات التي تمت تغطيتها في الفصل الثاني.



الشكل (3.8): الأشكال الأساسية للمرشحات.

كافة المرشحات المبينة في الشكل (3.8) لها ميزة مشتركة وهي انخفاض الاستجابة بمقدار -6 dB/octave بعد تردد القطع (تردد الـ -3 dB)، ويمكنك إثبات ذلك بنفسك بالعودة إلى الفصل الثاني، وإيجاد تغيرات الاستجابة رياضياً. يعمل المرشح ذو الانخفاض في الاستجابة بمعدل 6 dB/octave بشكلٍ جيد في بعض التطبيقات وخاصة إذا كانت الإشارات التي ترغب بالتخلص منها تقع بعد تردد القطع بكثير (أو قبله بكثيرٍ في مرشحات التمرير العالي)، أما في التطبيقات التي يُطلب فيها تحقيق انتقائية ترددية أعلى (تسطح أكبر للاستجابة في حزمة التمرير وانخفاض أكثر حدة في الاستجابة بعد تردد القطع، عندها لا تكفي مرشحات الـ -6 dB/octave، وعندها يلزمنا طريقة جديدة لتصميم المرشحات.

تكوين مرشحات بحزمة تمرير أكثر تسطحا وباستجابة اشد انخفاضا في حزمة المنع

يمكن تكوين مرشحات بانحدار أكبر في مميزة الاستجابة عن طريق وصل مجموعة من مرشحات الـ (6 dB/octave) على التوالي مع بعضها، ولكن وصل المرشحات بهذه الطريقة لزيادة التخميد خارج حزمة التمرير ليس بالسهولة التي قد يبدو عليها ويصبح هذا الوصل غير عملي في بعض الحالات (كما في تصميم مرشحات تمرير الحزمة الضيقة مثلاً). وعليك أن تناقش الاستجابات العابرة، ومشاكل إزاحة الصفحة، وانخفاض الإشارة، وسعات اللفات (winding capacitances)، والمقاومات الداخلية، والتقاط الضجيج المغناطيسي، وغيرها من الأمور الأخرى.

لإبقاء الأمور في النطاق العملي، سنترك الآن الدراسات النظرية المعقدة للمرشحات، وننتقل ببساطة إلى تطبيق قواعد التصميم التي تعتمد على منحنيات الاستجابة وجداول تصميم المرشحات، وهنا من المفيد الإشارة أن فهم المبادئ النظرية يحتاج إلى تركيز وقاعدة ممتازة في المعارف الكهربائية والإلكترونية، وعند الرغبة في التعمق في الدراسة النظرية للمرشحات يُنصح بالعودة إلى المراجع (يوجد مرجع مؤلفة Zvereck يغطي تقريباً كل شيء عن المرشحات).

سننتقل الآن مباشرة إلى بعض الأمثلة العملية في تصميم المرشحات والتي تتطلب درجات مختلفة من المرشحات (إذا كان انخفاض الاستجابة بعد تردد القطع يساوي (6 dB/octave) يكون المرشح من الدرجة الأولى، وفي مرشحات الدرجة الثانية يكون معدل الانخفاض (12 dB/octave).. وهكذا).

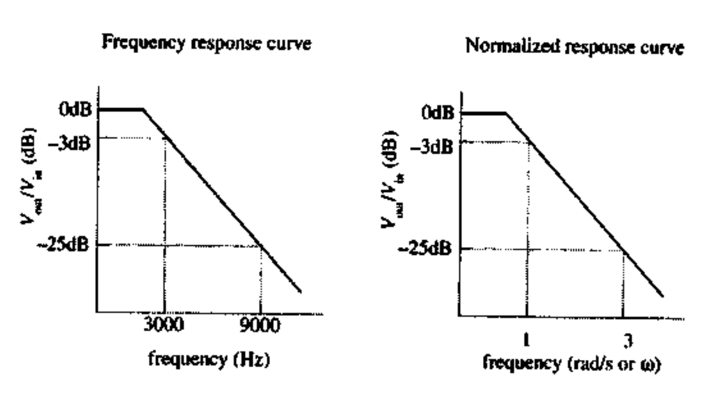
وعند التقدم مع هذه الأمثلة ستظهر مفاهيم جديدة. سندرس أولاً المرشحات غير الفعالة ثم ننتقل إلى المرشحات الفعالة.

3.8 تصميم مرشح تمرير منخفض

سنتعرف على خطوات تصميم مرشح تمرير منخفض له تردد قطع f_{3dB} = 3000 Hz، وتخميد يساوي (-25 dB) عند التردد 9000 Hz ونسمي التردد 9000 Hz باسم تردد التوقيف (f_S). سنفرض أن مقاومة المصدر (R_S) ومقاومة الحمل (R_L) متساويتان و($R_L = R_S = 50\ \Omega$).

الخطوة الأولى، النسب

ارسم شكلاً تقريبياً لطويلة $\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)$ كتابع للتردد كي تتكون لديك فكرة عامة عن شكل الاستجابة الترددية للمرشح الذي تريد تصميمه (انظر الشكل 4.8 اليساري). بعدها عليك أن تنسب هذا المنحني، وهذا يعني أن تردد القطع (أو تردد الـ -3 dB) f_{3dB} سيكون (1 rad/Sec).



الشكل (4.8)

ويبيّن الشكل (4.8) اليميني المنحني المنسوب، (ستعرف أهمية النسب لاحقاً عندما تبدأ بتطبيق أساليب التصميم التي تعتمد على المنحنيات المنسوبة والجداول). تستخدم العلاقة التالية من أجل حساب تردد التوقيف المنسوب

$$A_S = \frac{f_S}{f_{3dB}} = \frac{9000\ Hz}{3000\ Hz} = 3$$

ويسمى هذا العامل باسم عامل الانحدار (steepness factor).

وتلاحظ أن تردد التوقيف المنسوب أكبر بثلاث مرات من تردد القطع المنسوب وبذلك يكون تردد التوقيف المنسوب (3 rad/Sec).

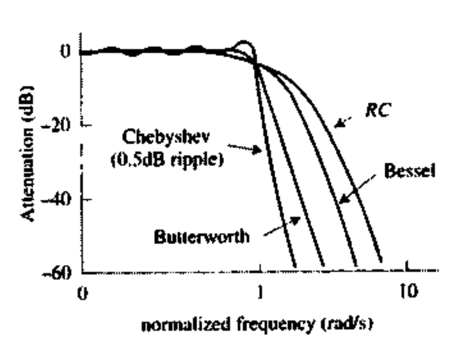
الخطوة الثانية، اختيار منحني الاستجابة

في الخطوة الثانية عليك اختيار نموذج استجابة المرشح، وهناك ثلاثة أنواع من النماذج لاستجابات المرشحات وهي استجابات بترورث (Butterworth)، وتشيبي شيف (chebyshev) وبِسل (Bessel).

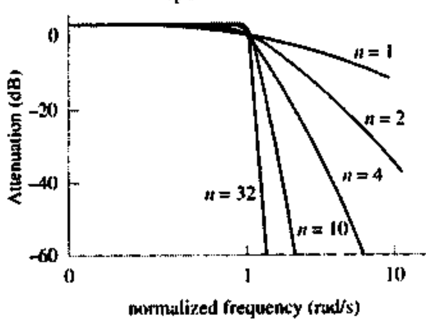
دون التعمق في الأمور الفنية نشير هنا إلى أن استجابات بتروورث، وتشيبي شيف، وبسل مسماة بأسماء أشخاص قاموا بالتعبير عن تابع نقل المرشح رياضياً بتوابع من الشكل:

$$T_{(S)} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_m S^m + N_{m-1} S^{m-1} + \dots\dots\dots \dots + N_1 S + N_0}{D_n S^n + D_{n-1} S^{n-1} + \dots\dots\dots \dots\dots + D_1 S + D_0}$$

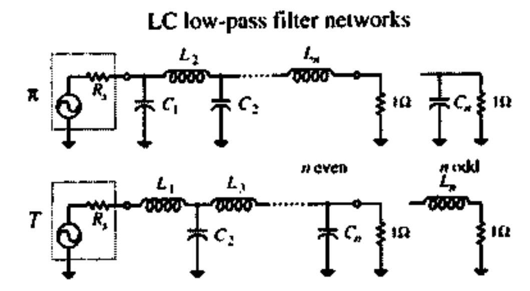
الثوابت N هي ثوابت البسط، أما الثوابت D فهي ثوابت المقام، و$(S = j\omega)$ وطبعاً $(j = \sqrt{-1})$. تسمى أعلى قوة لـــ (n) في مقام تابع النقل باسم درجة المرشح (Filter Order) أو عدد الأقطاب (Poles). أما أعلى قوة لـــ m في بسط تابع النقل فهي عدد الأصفار (Zeros)، ومن هذا التابع استطاع تشيبي شيف، وبتروورث وبسل الحصول على منحنيات خاصة بكل واحد منهم، وهذه المنحنيات تشبه منحنيات استجابة شبكات LC للمرشحات. من المفيد جداً أن تعرف أن عدد الأقطاب في تابع نقل مرشح يرتبط بعدد مقاطع (LC) الموجودة في دارة المرشح ويحدد الانحدار الكلي لمنحني الاستجابة (dB/octave). عند زيادة عدد الأقطاب تصبح الاستجابة المنحدرة أشد انحداراً. تؤثر ثوابت تابع النقل على الشكل العام لمنحني الاستجابة وترتبط هذه الثوابت مع القيم الخاصة للملفات والمكثفات في دارة المرشح. لكلٍ من تشيبي شيف، وبتروورث، وبسل توابع نقله الخاصة وتبيِّن هذه التوابع قيم الثوابت وكيفية التأثير على ميل انحدار الاستجابة عن طريق تغيير درجة تابع النقل. يتعامل بتروورث مع التابع بحيث يؤمن تسطحاً أعظمياً في حزمة التمرير على حساب شدة الانحدار في المنطقة العابرة بين حزمة التمرير وحزمة المنع، أما تشيبي شيف فيحقق عبوراً شديد الانحدار بين حزمة التمرير وحزمة المنع ولكن على حساب وجود تعرجات في منطقة (أو حزمة) التمرير. أما بسل فيقدم حلاً لتخفيض انزياحات الصفحة إلى الحد الأدنى ولكن على حساب التسطح في حزمة التمرير وشدة الانحدار في منطقة العبور. سنناقش الآن إيجابيات هذه الأنواع من المرشحات وسلبياتها وسنبدأ بالتركيز الآن على مرشحات بتروورث (Butterworth).



Normalized low-pass Butterworth filter reponse curves



LC low-pass filter networks

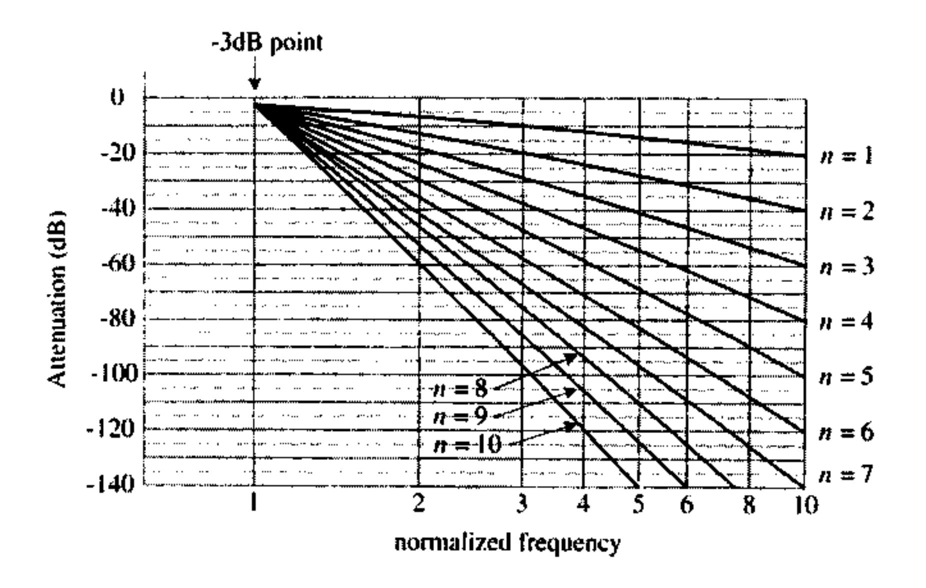


الشكل (5.8): أشكال استجابة مرشحات تشيبي شيف، بتروورث، وبسل ونماذج لدارات المرشحات.

الخطوة الثالثة (تحديد عدد الأقطاب اللازم)

سنتابع الآن مثالنا في تصميم مرشح تمرير منخفض، وسنختار الآن تصميم المرشح بحيث يكون من نوع بتروورث، وذلك لأنه أحد أكثر أنواع المرشحات شيوعاً. وفي هذه الخطوة سوف نستخدم منحنيات تخميد مرسومة كتابع للترددات المنسوبة، وهذه المنحنيات خاصة بمرشحات بتروورث للتمرير المنخفض (تُعطى هذه المنحنيات في كتب المرشحات (filters handbooks) مع منحنيات استجابة لمرشحات تشيبي شيف وبسل. الآن نختار المنحني الذي يؤمن (-25 dB) عند التردد المنسوب (3 rad/Sec) ومن الشكل (6.8) تلاحظ أن المنحني الملائم له n = 3، لأنه يؤمن التخميد المطلوب عند التردد

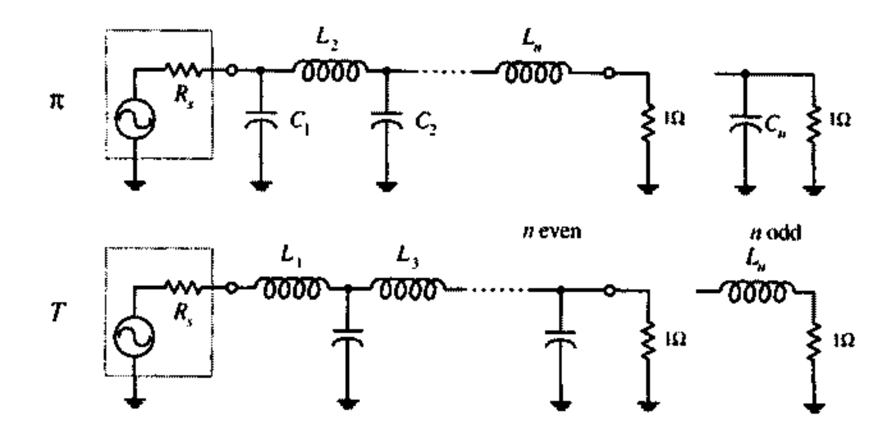
(3 rad/Sec). إذن المرشح اللازم هو مرشح تمرير منخفض من الدرجة الثالثة، وبما أن عدد الأقطاب هو ثلاثة، فإن عدد مقاطع (LC) اللازمة لبناء المرشح سيكون ثلاثة أيضاً.



الشكل (6.8): منحنيات تخميد لمرشحات بتروورث للتمرير المنخفض.

الخطوة الرابعة (تشكيل مرشح منسوب)

بعد تحديد درجة المرشح ننتقل إلى تشكيل المرشح المنسوب (normalized filter) المكون من مقاطع LC (وهذه الدارة لن تكون دارة المرشح النهائية وسوف تحتاج إلى تعديل)، والدارة التي يتم تشكيلها في هذه الفقرة تكون إما من الشكل (T) أو (π) كما في الشكل (7.8).



الشكل (7.8): الأشكال العامة لمرشح تمرير منخفض.

طبعاً يمكن استخدام الشكلين، ولكن الشكل (π) أكثر جاذبية لقلة عدد الملفات الموجودة فيه مقارنة مع الشكل (T)، ولكن إذا كانت ممانعة الحمل أكبر من ممانعة المصدر فمن الأفضل استخدام الشكل (T). إذا كانت ممانعة الحمل أصغر من ممانعة

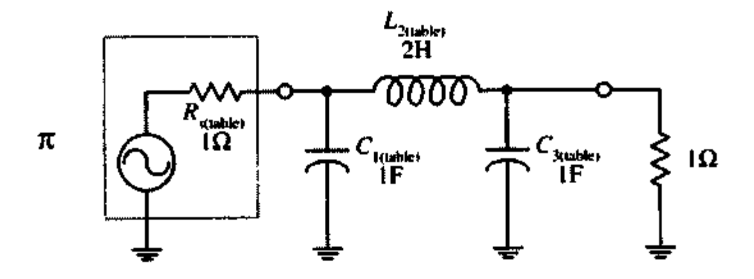
المصدر يُفضل استخدام الشكل (π). في مثالنا التصميمي لدينا ($R_S = R_L = 50\ \Omega$) نختار الشكل π وقيم الملفات والمكثفات موجودة في الجدول (1.8). تتوفر مثل هذه الجداول في كتب المرشحات (Filter Handbooks) لمرشحات تشيبي شيف وبسل أيضاً. بما أن المرشح الذي سيتم تصميمه من الدرجة الثالثة، عليك استخدام القيم الموجودة في السطر الثالث. تُعطى دارة المرشح المنسوب الذي تحصل عليه في الشكل (8.8).

الجدول (1.8): قيم عناصر مرشح بتروورث من نوع التمرير المنخفض.

n	R_S {$1/R_S$}	C_1 {L_1}	L_2 {C_2}	C_3 {L_3}	L_4 {C_4}	C_5 {L_5}	L_6 {C_6}	C_7 {L_7}
2	1.000	1.4142	1.4142					
3	1.000	1.0000	2.0000	1.0000				
4	1.000	0.7654	1.8478	1.8478	0.7654			
5	1.000	0.6180	1.6180	2.0000	1.6180	0.6180		
6	1.000	0.5176	1.4142	1.9319	1.9319	1.4142	0.5176	
7	1.000	0.4450	1.2470	1.8019	2.0000	1.8019	1.2470	0.4450

(π{T})

ملاحظة: إن قيم (L_n) و(C_n) هي لمقاومة (1 Ω) وتردد قطع (f_{3dB}) يساوي (1 rad/Sec) ووحدات الملفات هي الهنري (H) ووحدات المكثفات هي الفاراد (F)، وهذه القيم يجب أن تُضرب بعامل معيَّن (تُوزن Scaled).



الشكل (8.8): دارة المرشح المنسوب.

هذه الدارة ليست الدارة النهائية للمرشح والتي سوف تستخدم عملياً، وذلك لأن قيم العناصر الموجودة في هذه الدارة ليست واقعيَّة وسبب ذلك أن المنحنيات والجداول التي استخدمت للحصول على هذه الدارة هي منحنيات وجداول منسوبة.

من أجل الحصول على الدارة النهائية وقيم عناصرها العملية يجب ضرب الممانعات بعوامل معينة وهذا يقودنا إلى الخطوة التالية.

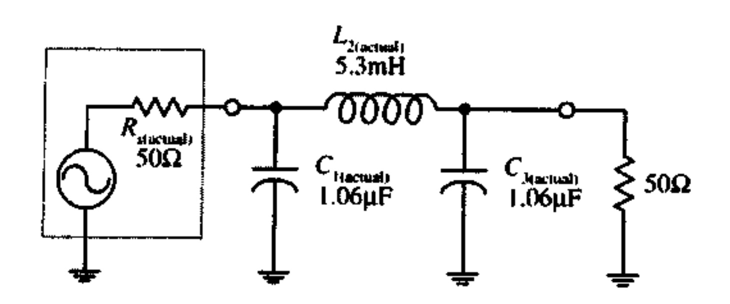
الخطوة الخامسة (ضرب التردد والممانعات بعوامل)

للحصول على القيم الفعلية لعناصر دارة المرشح، وللتخلص من التردد المنسوب تطبق القواعد التالية لإعادة وزن الممانعات (ضربها بعوامل). للتخلص من التردد المنسوب عليك تقسيم قيم الملفات والمكثفات التي حصلت عليها وفق الجدول على ($\omega = 2\pi f_c$)، وللحصول على قيم الملفات والمكثفات اضرب قيم المقاومات والملفات بممانعة الحمل وقسِّم المكثفات على ممانعة الحمل، وباختصار استخدم المعادلتين التاليتين للحصول على القيم الفعليَّة للعناصر.

$$L_{n(actual)} = \frac{(R_L)L_{(table)}}{2\pi f_{3dB}}$$

$$C_{n(actual)} = \frac{C_{n(table)}}{2\pi f_{3dB} R_L}$$

يبيِّن الشكل (9.8) الحسابات والشكل النهائي مع قيم العناصر الفعلية للمرشح.



الشكل (9.8): الدارة النهائية للمرشح المصمم في المثال.

4.8 ملاحظة عن أنواع المرشحات

بيِّنا سابقاً وباختصار أنه بالإمكان استخدام مرشحات chebyshev وBessel بدلاً من مرشحات بتروورث Butterworth، ومن أجل تصميم مرشحات تشيبي شيف وبِسل تستخدم نفس الطريقة الواردة سابقاً في تصميم مرشح بتروورث، ولكن عليك استخدام منحنيات تخميد وجداول مختلطة لكي تحصل على قيم عناصر المرشح نوع (T) أو (π)، وإذا كنت مهتماً بتصميم مرشحات تشيبي شيف وبِسل ننصحك بالعودة إلى كتب تصميم المرشحات. وسوف نوضح لك الآن الفروقات بين الأنواع المختلفة من المرشحات وذلك لكي يتكون لديك فهم أفضل للفروقات بين هذه المرشحات.

تعتبر مرشحات بتروورث من أكثر أنواع المرشحات استخداماً، وتمتاز باستجابة مسطحة جداً في المنطقة المتوسطة من حزمة التمرير، ولكن شكل الاستجابة بالقرب من تردد الـــ (-3 dB) يقترب من الشكل الدائري. يزداد معدَّل التخامد بعد تردد الـــ -3 dB بمعدَّل (nx6dB/octave) حيث n هي درجة المرشح فمثلاً يبلغ مقدار التخامد بعد f_{3dB} في مرشح درجة ثالثة (18 dB/octave).

تعتبر مرشحات بتروورث سهلة البناء (التنفيذ) والعناصر التي تستخدم فيها لا يجب أن تكون بالضرورة ذات دقة عالية (قليلة التسامح) كما هي الحال في غيرها من المرشحات.

تؤمن مرشحات تشيبي شيف (مثلاً ذات التعرج 0.5 dB أو 0.1 dB) معدلاً أعلى لانخفاض التخميد بعد تردد القطع f_{3dB} مقارنة مع مرشحات بتروورث وبِسل.

ولكن هناك ثمن يجب أن يدفع لقاء هذا الانخفاض الحاد في الاستجابة بعد تردد القطع، وهو وجود تعرج (تموُّج ripple) في حزمة التمرير، ويسمى هذا التموُّج بتموُّج حزمة التمرير (passband ripple)، ويزداد مقدار التعرُّج مع زيادة درجة المرشح، كما أن مرشحات تشيبي شيف أكثر حساسية لتسامحات قيم العناصر مقارنة مع مرشحات بِسل وبتروورث.

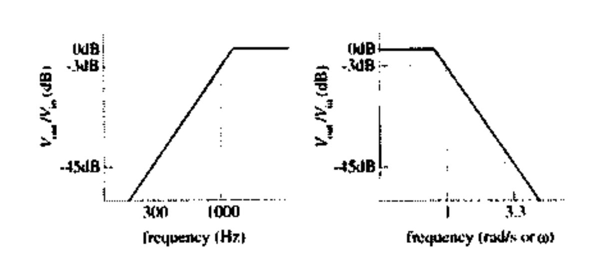
هناك مشكلة في مرشحات بتروورث وتشيي شيف، وهي أن هذه المرشحات تسبب مقداراً متغيراً من زمن التأخير للإشارات مختلفة الترددات.

فمثلاً إذا كانت هناك إشارة دخل مكونة من عدد من الترددات (إشارة معدلة مثلاً) فإن إشارة الخرج سوف تشوَّه لأن الترددات المختلفة سوف تؤخر بأزمنة مختلفة ويُسمى تغيُّر زمن التأخير (delay-time variation) في حزمة التمرير باسم تشويه التأخير (delay distortion) ويزداد هذا التشويه بازدياد درجة مرشح تشيي شيف وبتروورث. لتجنب هذا الأثر يمكن استخدام مرشح بِسل (Bessel Filter) وتمتاز مرشحات Bessel بأن لها تأخيراً ثابتاً في كامل حزمة التمرير، ولكن انخفاض الاستجابة بعد تردد القطع فيها ليس حاداً كما في مرشحات تشيي شيف وبتروورث، ولكن التخميد العالي بعد تردد القطع (أو الانخفاض السريع للاستجابة بعد تردد القطع) ليس دوماً هو الميزة الهامة والأكثر أهمية منه هو استعادة الإشارة بجودة عالية في خرج المرشح. وفي التطبيقات التي يكون فيها الحصول على إشارة غير مشوهة ضرورياً في خرج المرشح يُفضل استخدام مرشحات Bessel.

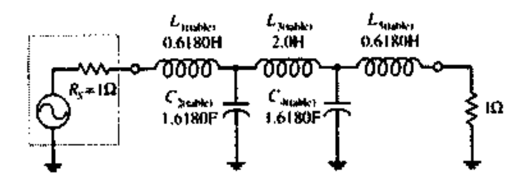
5.8 تصميم مرشحات التمرير العالي غير الفعالة (السلبيّة)

سندرس تصميم مرشح تمرير عالٍ له تردد قطع $f_{3dB} = 1000$ Hz وتخميد يساوي (45 dB-) عند التردد (300 Hz) ويسمى هذا التردد باسم تردد التوقيف (stop frequency) f_s، افرض أن المرشح مربوط مع مصدر وحمل ومقاومة المصدر تساوي مقاومة الحمل، أي ($R_S = R_L = 50\ \Omega$)، وأن الاستجابة المطلوبة هي استجابة Butterworth. كيف ستصمم هذا المرشح؟ إن طريقة التصميم، كما سترى، تتضمن التعامل مع استجابة مرشح التمرير العالي على أنها استجابة مرشح تمرير منخفض معكوسة، وبعد ذلك يُصمم مرشح تمرير منخفض منسوب (normalized)، وبتطبيق بعض قوانين التحويل على عناصر مرشح التمرير المنخفض يتم الحصول على عناصر منسوبة لمرشح التمرير العالي وبفك النسب (الضرب بعوامل) يتم الحصول على القيم الفعلية لدارة المرشح.

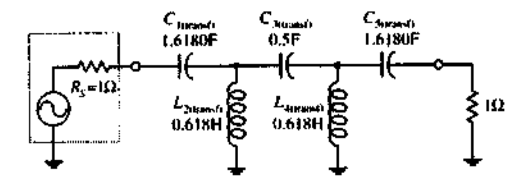
في الخطوة الأولى تُرسم استجابة مرشح التمرير العالي كما في الشكل (10.8) اليساري بعد ذلك دوِّر منحني الاستجابة في الاتجاه الأفقي فتحصل على منحني استجابة مرشح تمرير منخفض وبعد ذلك يتم نسب استجابة مرشح التمرير المنخفض (لأن ذلك يسمح لك باستخدام تقنيات تصميم مرشحات التمرير المنخفض)، وفيما بعد عليك استخدام طريقة تحويل وتطبيقها على قيم عناصر مرشح التمرير المنخفض المنسوبة للحصول على القيم المنسوبة لعناصر مرشح التمرير العالي. لإيجاد عامل الانخفاض (A_S) وتردد التوقيف المنسوب (f_s) عليك استخدام نفس الإجراءات الواردة في مثال تصميم مرشح التمرير المنخفض السابق، ولكن هنا نقسِّم f_{3dB} على f كما يلي:



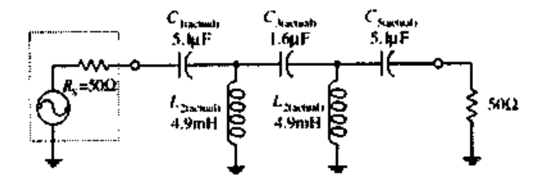
Start with a "T" low-pass filter...



Transform low-pass filter into a high-pass filter...



Impedance and frequency scale high-pass filter to get final circuit



الشكل (10.8): استجابات ودارات المثال التصميمي لمرشح تمرير عالٍ.

$$A_S = \frac{f_{3dB}}{f_s} = \frac{1000\,Hz}{300\,Hz} = 3.3$$

ومنها تلاحظ أن تردد التوقيف المنسوب أكبر بـــ (3.3) مرة من تردد القطع المنسوب، وبما أن المنحنيات المنسوبة تعتبر التردد f_{3dB} مساوياً (1 rad/S)، فإن f_s يصبح (3.3 rad/S).

وفي الخطوة التالية عليك اختيار استجابة التمرير المنخفض كما في الخطوة المقابلة من المثال السابق وعليك إذن أن تختار من الشكل (6.8) الاستجابة التي تحقق تخميداً (45 dB-) عند (3.3 rad/S)، وعندها تجد أن (n = 5). إذن عليك تشكيل مرشح LC من الدرجة الخامسة، والسؤال المطروح هو هل ستختار مرشح نوع (π) أو نوع T؟ في البداية يمكن أن تفترض أن مرشح نوع (π) سيكون الأفضل، وذلك لأن مقاومات الحمل ومصدر الإشارة متساوية، وكذلك لأن عدد الملفات قليل، ولكن عند إجراء التحويل للعودة إلى مرشح التمرير العالي عليك تبديل المكثفات بملفات والملفات بمكثفات، ولذلك عليك الآن اختيار مرشح نوع T كي يكون عدد الملفات بعد التحويل قليلاً. يبيِّن الشكل (10.8) دارة مرشح تمرير منخفض من الدرجة الخامسة منسوب.

لتحويل مرشح التمرير المنخفض إلى مرشح تمرير عالٍ يستبدل كل ملف بمكثف قيمته تساوي (1/L) ويستبدل كل مكثف بملف قيمته تساوي (1/C)، إذن عليك القيام بالعمليات التالية

$$C_{1(trans)} = \frac{1}{L_{1(table)}} = \frac{1}{0.6180} = 1.6180\,F$$

$$L_{2(trans)} = \frac{1}{C_{2(table)}} = 1/1.618 = 0.6180\,H$$

$$C_{3(trans)} = 1/L_{3(table)} = 1/2.0 = 0.5F$$
$$L_{4(trans)} = 1/C_{4(table)} = 1/1.6180 = 0.6180\,H$$
$$C_{5(trans)} = 1/L_{5(table)} = 1/0.6180 = 1.6180\,F$$

بعد ذلك يتم فك نسب (ضرب بعوامل) التردد وقيم العناصر للحصول على القيم الفعلية للعناصر

$$C_{1(actual)} = \frac{C_{1(trans)}}{2\pi f_{3dB} R_L} = \frac{1.618H}{2\pi(1000\,Hz)(50\,\Omega)} = 5.1\mu F$$

$$C_{3(actual)} = \frac{C_{3(trans)}}{2\pi f_{3dB} R_L} = \frac{0.5H}{2\pi(1000\,Hz)(50\,\Omega)} = 1.6\mu F$$

$$C_{5(actual)} = \frac{C_{5(trans)}}{2\pi f_{3dB} R_L} = \frac{1.618H}{2\pi(1000\,Hz)(50\,\Omega)} = 5.1\mu F$$

$$L_{2(actual)} = \frac{L_{2(trans)} R_L}{2\pi f_{3dB}} = \frac{(0.6180\,H)(50\,\Omega)}{2\pi(1000\,Hz)} = 4.9mH$$

$$L_{4(actual)} = \frac{L_{4(trans)} R_L}{2\pi f_{3dB}} = \frac{(0.6180\,H)(50\,\Omega)}{2\pi(1000\,Hz)} = 4.9mH$$

6.8 تصميم مرشح تمرير حزمة سلبي

تُصنف مرشحات تمرير الحزمة إلى مرشحات تمرير حزمة عريضة ومرشحات تمرير حزمة ضيقة والفرق بين النوعين هو نسبة (f_2/f_1) باعتبار أن (f_2) هو التردد الأعظمي لحزمة التمرير و(f_1) هو التردد الأصغري لحزمة التمرير. إذا كان (f_2/f_1) أكبر من (1.5) فإن المرشح يُصنف كمرشح تمرير حزمة عريضة، وإذا كانت النسبة أصغر من (1.5) فالمرشح هو مرشح تمرير حزمة ضيقة، وكما سترى لاحقاً تختلف إجراءات تصميم مرشح تمرير الحزمة العريضة عن إجراءات تصميم مرشح تمرير الحزمة الضيقة.

تصميم مرشح الحزمة العريضة

الطريقة المستخدمة في تكوين مرشح تمرير الحزمة العريضة هي وصل مرشح تمرير منخفض مع مرشح تمرير عالٍ مع بعضهما وسيوضح المثال التالي تفصيلات هذه الطريقة.

مثال:

صمم مرشح تمرير حزمة ترددات قطعه هي $f_1 = 1000$ Hz و $f_2 = 3000$ Hz وطويلة $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ مقدرة بالـ dB عند التردد (300 Hz) هي على الأقل [45 dB-] وعند التردد 900 Hz أكثر من [25 dB-]. افرض أن ممانعة مصدر الإشارة تساوي ممانعة الحمل $R_S = R_L = 50\ \Omega$ وأن الاستجابة المطلوبة من نوع بتروورث.

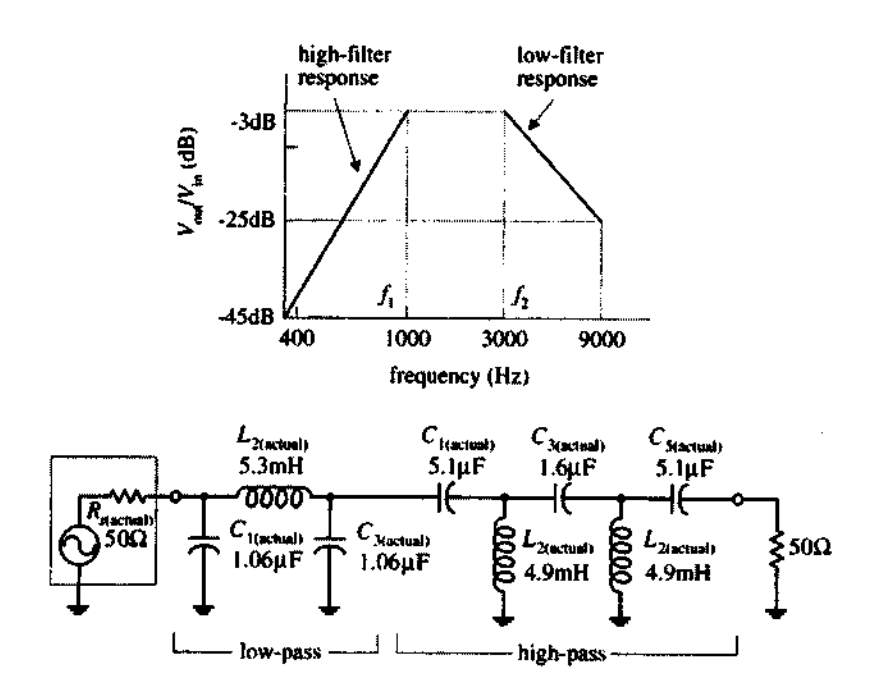
الحل: يبيِّن الشكل (11.8) الاستجابة الترددية الأساسية المطلوبة. النسبة $f_2/f_1 = 3 > 1.5$ ولذلك نحتاج إلى مرشح تمرير حزمة عريضة. لاحظ من الشكل أن الاستجابة الكلية للمرشح تشبه استجابات مرشح تمرير عالٍ ومرشح تمرير منخفض موجودتين مع بعضهما على نفس الشكل. بتقسيم الاستجابة المرسومة إلى استجابات تمرير عالٍ وتمرير منخفض تحصل على النتائج التاليّة.

مرشح التمرير المنخفض:

- تردد القطع f_{3dB} (الذي يوافق انخفاض 3 dB-) يساوي 3000 Hz.
- تردد العبور f_s (الذي يكون عنده $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ مساوياً 25 dB-) هو 9000 Hz

مرشح التمرير العالي:

- تردد القطع f_{3dB} (يوافقه انخفاض 3 dB-) هو 1000 Hz.
- تردد العبور f_s (وعنده يكون $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ يساوي 45 dB-) هو 300 Hz.



الشكل (11.8): استجابة المرشح ودارته النهائية.

لتصميم مرشح تمرير الحزمة العريضة المطلوبة، صمم مرشحات التمرير العالي والمنخفض السابقة باستخدام القيم المعطاة وبنفس الطرق الواردة في الأمثلة السابقة، وبعد الانتهاء من عملية التصميم أوصل المرشحين مع بعضهما كما في الشكل (11.8) وتلاحظ أن المرشحين المطلوب تصميمهما هنا هما نفس المرشحات المصممة في الأمثلة السابقة. انظر الشكل (11.8) لرؤية الدارة النهائية للمرشح المطلوب.

تصميم مرشح تمرير الحزمة الضيقة

لا يمكن تصميم مرشحات تمرير الحزمة الضيقة ($f_2/f_1 < 1.5$) ببساطة بوصل مرشحي تمرير عالٍ ومنخفض مع بعضهما، وبدلاً من ذلك تستخدم طريقة تصميم جديدة تعتمد على تحويل حزمة تمرير المرشح ($\Delta f_{BW} = f_2 - f_1$) إلى تردد قطع ($f_{3dB}$) لمرشح تمرير منخفض. وبنفس الوقت تحوَّل حزمة المنع لمرشح الحزمة إلى تردد المنع (stop-band frequency) لمرشح تمرير منخفض.

وبالانتهاء من ذلك تحصل على مرشح تمرير منخفض منسوب (normalized low-pass filter)، وهذا المرشح يُعاد بعملية فك النسب (Scaling) وبطريقة خاصة بحيث يتم الحصول على مرشح تمرير الحزمة المطلوب، وطبعاً يجب أن تُفك نسب الممانعات في الدارة المنسوبة. عند فك النسب الترددي للعناصر في مرشح التمرير المنخفض المنسوب لا تضرب بالعامل ($\omega = 2\pi f_{3dB}$) كما كنت تفعل عند فك نسب مرشح تمرير منخفض وبدلاً من ذلك قسِّم قيم عناصر مرشح التمرير المنخفض المنسوب على ($2\pi\,(\Delta f_{BW})$)، وفي الخطوة التالية يجب إضافة ملف على التسلسل مع كل مكثف موجود في فرع من فروع دارة مرشح التمرير المنخفض وإضافة مكثف على التوازي مع كل ملف بحيث يكون لكل فرع تردد طنين يساوي التردد المركزي (f_0) لمرشح تمرير الحزمة. وهذه العملية تؤدي إلى خلق (تكوين) فروع كل واحد منها عبارة عن دارة طنين. تحدد قيم الملف (L) أو المكثف (C) الذي يُضاف إلى كل فرع من العلاقة

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

مثال تصميم مرشح تمرير حزمة ضيقة

صمم مرشح تمرير حزمة له $f_1 = 900\ Hz$ و $f_2 = 1100\ Hz$ وفيه $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ عند التردد (800) هرتز تساوي على الأقل $-20\ dB$ وكذلك عند التردد $1200\ Hz$. افرض أن $R_S = R_L = 50\ \Omega$، وأن الاستجابة المطلوبة هي استجابة بتروورث Butterworth.

الحل:

بما أن ($f_2/f_1 = 1.2$) وهي أقل من (1.5)، إذن المرشح اللازم هو مرشح تمرير حزمة ضيقة، والخطوة الأولى في عملية التصميم هي نسب متطلبات حزمة التمرير. المتوسط الهندسي لترددي عرض الحزمة هو:

$$f_0 = \sqrt{f_1 . f_2} = \sqrt{(900\ Hz)(1100\ Hz)} = 995\ Hz$$

نحسب زوجي ترددات حزمة التوقيف المنسوبين إلى التردد المتوسط الهندسي باستخدام:

$$f_a f_b = f_0^2$$

$$f_a = 800\ Hz,\ f_b = \frac{f_0^2}{f_a} = \frac{(995\ Hz)^2}{800\ Hz} = 1237\ Hz$$

$$f_b - f_a = 437\ Hz$$

$$f_b = 1200\ Hz \Rightarrow f_a = \frac{f_0^2}{f_b} = \frac{(995\ Hz)^2}{1200\ Hz} = 825\ Hz$$

$$f_b - f_a = 375\ Hz$$

لاحظ أن الأشياء تبدو متضاربة، ولكل زوج من ترددات التوقيف تحصل على زوجين جديدين، وذلك نتيجة لجعل الأشياء متناظرة بالنسبة لـــ (f_0).

اختر الزوج الذي له أقل فصل (Least Separation) والذي يمثل المتطلبات الأكثر حدة وهو التردد (375 Hz).

يُعطى عامل الانحدار لمرشح تمرير الحزمة بالعلاقة:

$$A_S = \frac{\text{عرض حزمة المنع}}{\text{تردد الـ (-3dB) حزمة المنع}} = \frac{375}{200\,\text{Hz}} = 1.88$$

اختر استجابة بتروورث لمرشح تمرير منخفض تُعطي على الأقل -20 dB عند التردد (1.88 rad/S). وفقاً للشكل (6.8) نلاحظ أن المنحني الذي له (n = 3) يحقق المطلوب، والخطوة التالية هي تكوين مرشح منخفض درجة ثالثة منسوب وذلك باستخدام الشكل (π) للمرشح والجدول (1.8).

بعد ذلك تُضرب الممانعات والتردد بعوامل (scaling) وهنا تستخدم ممانعة حمل تساوي (50 Ω) وعرض حزمة مرشح تمرير الحزمة ($\Delta f_{BW} = f_2 - f_1 = 200$ Hz) فتحصل على:

$$C_{1(actual)} = \frac{C_{1(table)}}{2\pi(\Delta f_{BW})R_L} = \frac{1F}{2\pi(200\,Hz)(50\,\Omega)} = 15.92\,\mu F$$

$$C_{3(actual)} = \frac{C_{3(table)}}{2\pi(\Delta f_{BW})R_L} = \frac{1F}{2\pi(200\,Hz)(50\,\Omega)} = 15.92\,\mu F$$

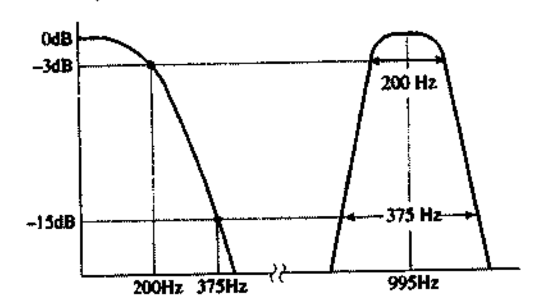
$$L_{2(actual)} = \frac{(2H)R_L}{2\pi(\Delta f_{BW})} = \frac{2H(50\,\Omega)}{2\pi(200\,Hz)} = 79.6\,mH$$

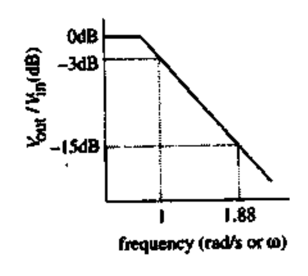
والشيء الهام في المثال هو أن كل فرع من فروع مرشح التمرير المنخفض يجب أن يهتز على التردد (f_0) وذلك بإضافة مكثف تسلسلي مع كل ملف تسلسلي وملف تفرعي مع كل مكثف تفرعي وتحسب قيم العناصر التي تتم إضافتها كما يلي:

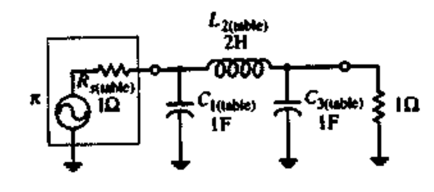
$$L_{(parallel\ with\ C_1)} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_{1(actual)}} = \frac{1}{(2\pi.995\,Hz)^2.(15.92\,\mu F)} = 1.61\,mH$$

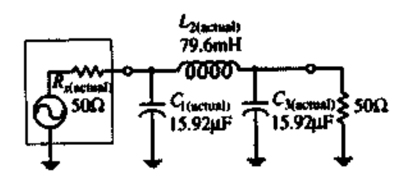
$$L_{(parallel\ with\ C_3)} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_{3(actual)}} = \frac{1}{(2\pi.995\,Hz)^2.(15.92\,\mu F)} = 1.61\,mH$$

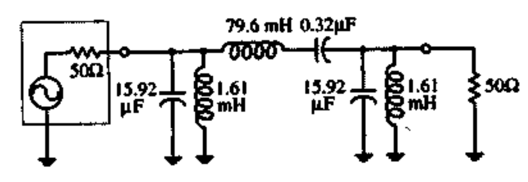
$$C_{(series\ with\ L_2)} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_{2(actual)}} = \frac{1}{(2\pi.995\,Hz)^2.(79.6\,mH)} = 0.32\,\mu F$$







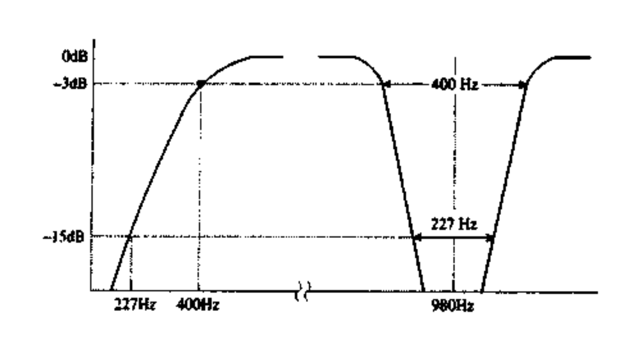


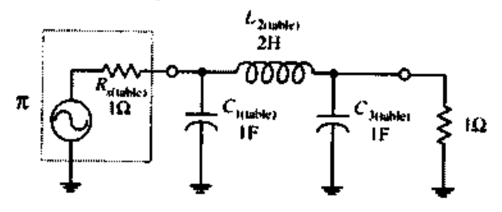


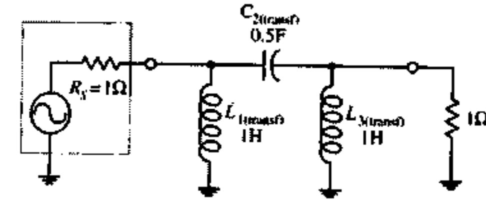
الشكل (12.8): دارة مرشح تمرير منخفض منسوب واستجابات منسوبة.

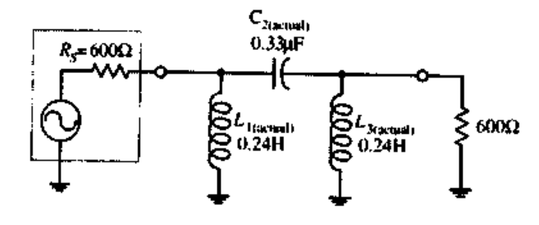
7.8 تصميم مرشح حجز حزمة سلبي

تطبق طريقة تصميم مرشح تمرير الحزمة أيضاً على تصميم مرشحات حجز الحزمة ولكن هنا يتم استخدام مرشح تمرير عال بدلاً من مرشح التمرير المنخفض كحجر بناء أساسي للمرشح، وتتلخص الفكرة هنا في إيجاد ربط بين عرض حزمة مرشح حجز الحزمة ($\Delta f_{BW} = f_1 - f_2$) مع تردد القطع لمرشح التمرير العالي وعرض حزمة التوقيف لمرشح حجز الحزمة مع تردد حزمة التوقيف (stop-band-frequency) لمرشح التمرير العالي، وبعد ذلك يتم تكوين مرشح التمرير العالي المنسوب، ثم يتم فك نسب المرشح بطريقة خاصة حيث تقسّم كافة العناصر على ($2\pi\, \Delta f_{BW}$)، وفي هذه الحالة أيضاً تستخدم طريقة فك نسب الممانعات. كما في مرشح تمرير الحزمة، يجب أن تهتز كافة فروع دارة مرشح حجز الحزمة على التردد المركزي لحزمة المنع (f_0) ويتحقق ذلك بوصل مكثفات تسلسلية مع الملفات ووصل ملفات تفرعية مع المكثفات الموجودة.









الشكل (13.8): العلاقات بين استجابات حجز الحزمة والتمرير العالي، دارة مرشح التمرير المنخفض المنسوب، دارة مرشح التمرير العالي المنسوب، دارة مرشح التمرير العالي الفعلي، دارة مرشح حجز الحزمة الفعلي.

مثال

صمّم مرشح حجز حزمة له $f_1 = 800$ Hz، $f_2 = 1200$ Hz وفيه $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ يساوي على الأقل 20 dB- عند الترددات 900 Hz و 1100 Hz. افرض أن ممانعة مصدر الإشارة تساوي ممانعة الحمل $R_S = R_L = 600\ \Omega$ وأن استجابة بترورث هي الاستجابة المطلوبة

الحل:

نوجد التردد المتوسط الهندسي للترددات (f_1) و(f_2):

$$f_0 = \sqrt{(f_1)(f_2)} = \sqrt{(800\ Hz)(1200\ Hz)} = 980\ Hz$$

نوجد زوجي ترددات حزمة التوقيف المرتبطة ببعضها هندسياً:

$$f_a = 900\ Hz;\ f_b = \frac{f_0^2}{f_a} = \frac{(980\ Hz)^2}{900\ Hz} = 1067\ Hz$$

$$f_b - f_a = 1067\ Hz - 900\ Hz = 167\ Hz$$

$$f_b = 1100\ Hz;\ f_a = \frac{f_0^2}{f_b} = \frac{(980\ Hz)^2}{1100\ Hz} = 873\ Hz$$

$$f_b - f_a = 1100\ Hz - 873\ Hz = 227\ Hz$$

اختر الزوج الذي يوافق المتطلبات الأكثر حدة وهو زوج الـــ 227 Hz.

احسب عامل الانحدار لمرشح توقيف الحزمة من العلاقة:

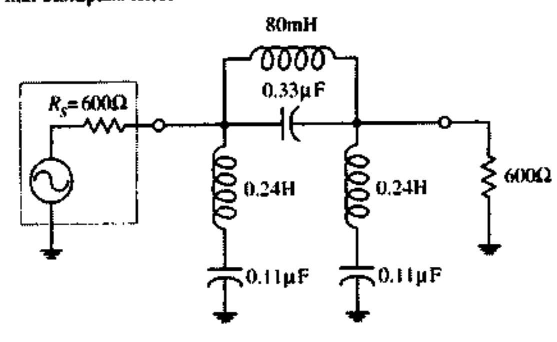
$$A_S = \frac{-3dB\ bandwidth}{Stop-band\ bandwidth} = \frac{400\ Hz}{227\ Hz} = 1.7$$

اعتبر أن عامل الانحدار لمرشح حجز الحزمة هو عامل الانحدار لمرشح التمرير العالي واستخدم الطريقة الواردة سابقاً لتصميم مرشح تمرير عال حيث يجب عليك أن تدوِّر استجابة مرشح التمرير العالي حول تردد القطع 400 Hz وبشكلٍ أفقي كي تحصل على استجابة مرشح تمرير منخفض وبعد ذلك انسب استجابة مرشح التمرير المنخفض معتبراً أنّ تردد التوقيف المنسوب يساوي 1.7 rad/S) واستخدم الشكل (6.8) فتلاحظ أن (n = 3) يؤمن $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ يساوي على الأقل (-20 dB) عند التردد المنسوب 1.7 rad/S). استخدم الجدول (1.8) والدارة (π) لتحصل على مرشح التمرير المنخفض المنسوب، ثم استخدم التحويل من تمرير منخفض إلى تمرير عالٍ لتحصل على مرشح التمرير العالي المنسوب

$L_{1(transf)} = 1/C_{1(table)} = 1/1 = 1\ H$

$L_{3(transf)} = 1/C_{3(table)} = 1/1 = 1\ H$

$C_{2(transf)} = 1/L_{2(table)} = 1/2 = 0.5\ F$



تابع الشكل (13.8): العلاقات بين استجابات حجز الحزمة والتمرير العالي، دارة مرشح التمرير المنخفض المنسوب، دارة مرشح التمرير العالي المنسوب، دارة مرشح التمرير العالي الفعلي، دارة مرشح حجز الحزمة الفعلي.

تبيّن الدارات الثلاثة الأولى في الشكل (13.8) عملية التحويل من مرشح تمرير منخفض إلى مرشح تمرير عال، يتم فك نسب الممانعات والترددات في مرشح التمرير العالي المنسوب وفي عملية فك النسب نعتبر أن $R_L = 600\ \Omega$ و $\Delta f_{BW} = f_2 - f_1$ وطبعاً $\Delta f_{BW} = 400\ Hz$. لاحظ عملية فك النسب

$$L_{1(actual)} = \frac{R_1 L_{1(transf)}}{2\pi\Delta f_{BW}} = \frac{(600\,\Omega)(1H)}{2\pi(400\,Hz)} = 0.24H$$

$$L_{3(actual)} = \frac{R_1 L_{3(transf)}}{2\pi\Delta f_{BW}} = \frac{(600\,\Omega)(1H)}{2\pi(400\,Hz)} = 0.24H$$

$$C_{3(actual)} = \frac{C_{1(transf)}}{2\pi(\Delta f_{BW})R_L} = \frac{(0.5F)}{2\pi(400\,Hz)(600\,\Omega)} = 0.33\mu F$$

وأخيراً نجري التعديل الهام حيث نجعل كل فرع من أفرع الدارة يهتز على التردد f_0 لمرشح حجز الحزمة يوصل مكثف تسلسلي مع كل ملف ويوصل ملف تفرعي مع كل مكثف وفيما يلي قيم العناصر التي تُضاف إلى الدارة

$$C_{(series\ with\ L_1)} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_{1(actual)}} = \frac{1}{(2\pi.400\,Hz)^2(0.24H)} = 0.11\mu F$$

$$C_{(series\ with\ L_3)} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_{3(actual)}} = \frac{1}{(2\pi.400\,Hz)^2(0.24H)} = 0.11\mu F$$

$$L_{(parallel\ with\ L_1)} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_{2(actual)}} = \frac{1}{(2\pi.400\,Hz)^2(0.33\mu F)} = 80mH$$

والدارة النهائية مبينة أسفل الشكل (13.8).

8.8 تصميم المرشحات الفعالة

تُغطي هذه الفقرة بعض المبادئ الأساسية في تصميم مرشحات بتروورث الفعالة.

وقد ناقشنا عملية تصميم المرشحات الفعالة بكل مالها وما عليها سابقاً في هذا الفصل. وسنركز هنا على طريقة التصميم المستخدمة للحصول على مرشح بربح واحدي. وسنبدأ بتصميم مرشح تمرير منخفض.

1.8.8 مثال عن تصميم مرشح تمرير منخفض

صمِّم مرشح تمرير منخفض نوع بتروورث بتردد قطع 100 Hz وله $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ تساوي على الأقل 60 dB- عند التردد 400 Hz والذي سنسميه بتردد التوقيف (stop frequency f_S).

الخطوة الأولى: ننسب استجابة المرشح ونوجد عامل الانحدار:

$$A_S = \frac{f_S}{f_{3dB}} = \frac{400\ Hz}{100\ Hz} = 4$$

وهذا يعني أن (f_S) المنسوب يساوي (4 rad/Sec)، انظر الشكل (14.8).

استخدم منحنيات استجابة بتروورث لمرشحات التمرير المنخفض (الشكل 6.8) لتحديد درجة المرشح، وفي هذا المثال تلاحظ أن (n = 5) يؤمن $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right| = -60\,dB$ عند التردد المنسوب (4 rad/S) وبذلك تلاحظ أنك تحتاج إلى مرشح درجة خامسة. الآن، وبشكلٍ مخالف للمرشحات غير الفعالة، نحتاج هنا إلى مجموعة مختلفة من دارات المرشحات ومن الجداول للحصول على قيم عناصر الدارات. يبيِّن الشكل (14.8) بعض دارات المرشحات الفعالة الأساسية وهي دارة مرشح ثنائي القطب (درجة ثانية) ومرشح ثلاثي القطب (درجة ثالثة)، والمرشح اليساري هو من الدرجة الثانية واليميني من الدرجة الثالثة. ومن أجل تصميم مرشح تمرير منخفض منسوب نوع بتروورث بدرجة معينة يمكنك استخدام الجدول (2.8). تُعطى في كتب المرشحات جداول مماثلة لمرشحات بسل (Bessel) ولـــ تشيبي شيف. للحصول على مرشح تمرير منخفض درجة خامسة نحتاج لوصل مرشح درجة ثالثة مع مرشح درجة ثانية وتؤخذ قيم العناصر من الجدول (2.8). يبيِّن الشكل (15.8) دارة المرشح المنسوب.

الشكل (14.8): منحنيات استجابة مرشح تمرير منخفض عاديّة، ومنسوبة ودارات مرشحات تمرير منخفض درجة ثالثة ـ وثانية

الجدول (2.8): قيم عناصر مرشحات بتروورث منسوبة (تمرير منخفض).

ORDER n	NUMBER OF SECTIONS	SECTIONS	C_1	C_2	C_3
2	1	2-pole	1.414	0.7071	
3	1	3-pole	3.546	1.392	0.2024
4	2	2-pole	1.082	0.9241	
		2-pole	2.613	0.3825	
5	2	3-pole	1.753	1.354	0.4214
		2-pole	3.235	0.3090	
6	3	2-pole	1.035	0.9660	
		2-pole	1.414	0.7071	
		2-pole	3.863	0.2588	
7	3	3-pole	1.531	1.336	0.4885
		2-pole	1.604	0.6235	
		2-pole	4.493	0.2225	
8	4	2-pole	1.020	0.9809	
		2-pole	1.202	0.8313	
		2-pole	2.000	0.5557	
		2-pole	5.758	0.1950	

يحقق المرشح المنسوب الاستجابة المنسوبة الصحيحة ولكن قيم عناصر دارته غير عمليّة (قيم العناصر كبيرة جداً) ولجعل قيم هذه العناصر فعليّة يجب فك نسب عناصر الدارة، ومن أجل فك النسب الترددي تقسّم قيم مكثفات الدارة على ($2\pi f_{3dB}$)، أما المقاومات فلا حاجة لفك نسبها ترددياً، أما بخصوص فك النسب للممانعات فلا ضرورة هنا للتفكير بتلاؤم ممانعات مصدر الإشارة والحمل وببساطة تضرب قيم مقاومات دارة المرشح المنسوبة بعامل (Z) وتقسّم المكثفات على نفس العامل، ويتم اختيار (Z) بحيث تكون القيم النهائية لعناصر المرشح غير المنسوب عمليّة، والقيمة النموذجية للعامل (Z) هي $Z = 10.000\ \Omega$ والعلاقات النهائية لفك النسب هي:

$$C_{(actual)} = \frac{C_{(table)}}{Z.2\pi f_{3dB}}$$

$$R_{(actual)} = Z.R_{(table)}$$

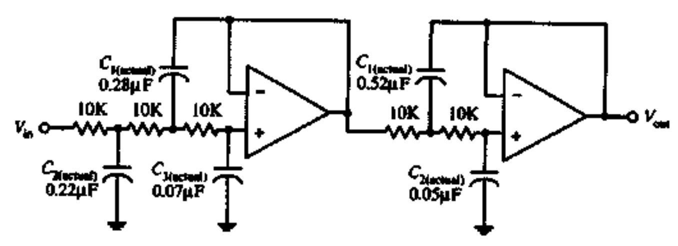
وباعتبار $Z = 10000$ تحصل على القيم الفعليّة لعناصر المرشح والمبينة على الشكل (15.8).

2.8.8 مثال لمرشح تمرير عالٍ فعّال

إنّ الطريقة التي تستخدم لتصميم مرشحات التمرير العالي الفعالة تشبه طريقة تصميم مرشحات التمرير العالي غير الفعالة. خذ مرشح تمرير منخفض منسوب، حوّل هذا المرشح إلى دارة مرشح تمرير عالٍ ثم أجرِ عملية فك نسب.

Normalized low-pass filter

Final low-pass filter



الشكل (15.8): دارة المرشح النهائية المطلوب تصميمها.

مثال:

صمم مرشح تمرير عالٍ تردد قطعة (1000 Hz) له $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right| = -50\,dB$ على الأقل عند التردد 300 Hz.

الحل:

في الخطوة الأولى تحوَّل استجابة مرشح التمرير العالي إلى استجابة مرشح تمرير منخفض منسوبة كما في الشكل، ويُحسب عامل الانحدار لمرشح التمرير المنخفض المكافئ من العلاقة:

$$A_S = \frac{f_{3dB}}{f_S} = \frac{1000\ Hz}{300\ Hz} = 3.3$$

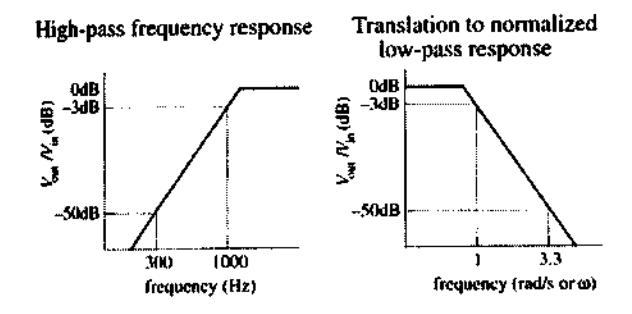
وهذا يعني أن تردد التوقيف المنسوب سيكون (3.3 rad/S). من منحنيات الاستجابة المنسوبة لمرشحات بتروورث المعطاة في الشكل (6.8) تُلاحظ أن (n = 5) تحقق الاستجابة بالتخميد المطلوب. وكما في المثال السابق نحتاج إلى مرشح درجة خامسة مكون من مرحلتين (درجة ثالثة) و(درجة ثانية)، انظر الشكل (16.8).

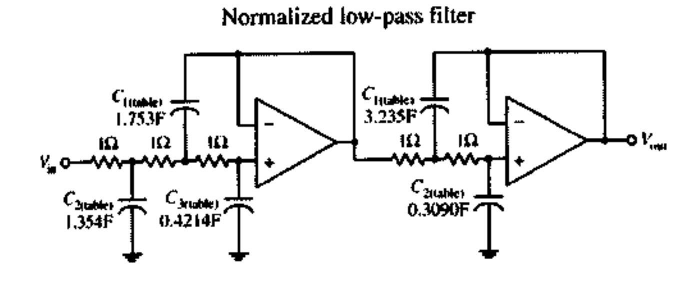
في الخطوة الثانية يجب أن يُحوَّل مرشح التمرير المنخفض المنسوب إلى مرشح تمرير عالٍ منسوب، ولإجراء هذا التحويل تستبدل المقاومات بمكثفات قيمها تساوي F (1/R) وتستبدل المكثفات بمقاومات تساوي قيمها Ω (1/C) وتبيِّن الدارة الثانية في الشكل (16.8) مرشح التمرير العالي المنسوب. يجب فك نسب عناصر الدارة للحصول على الدارة المطلوبة النهائية:

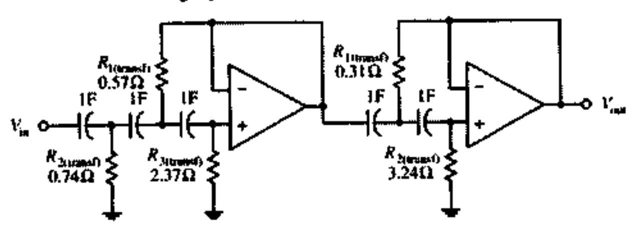
$$C_{(actual)} = \frac{C_{(trans)}}{Z.2\pi f_{3dB}}$$

$$R_{(actual)} = Z.R_{(transf)}$$

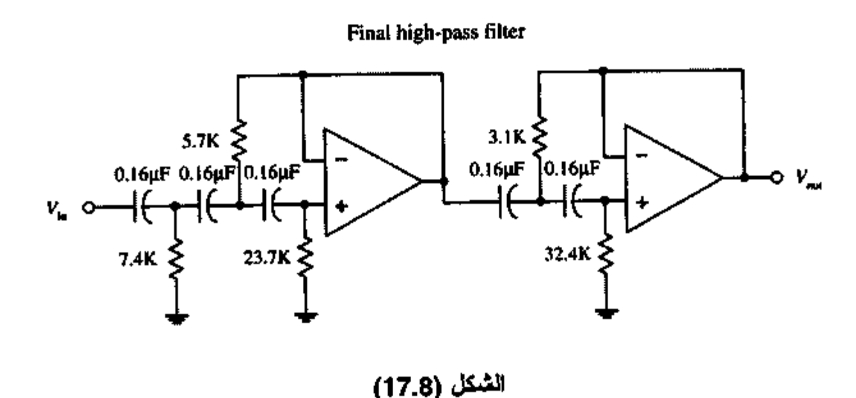
نختار Z = 10000 Ω فتكون دارة المرشح المطلوب تصميمها كما في الشكل (17.8).







الشكل (16.8): استجابة مرشح تمرير عالٍ، استجابة مرشح تمرير منخفض منسوبة ودارة مرشح تمرير منخفض درجة خامسة، ودارات مرشح تمرير عالٍ.



الشكل (17.8)

3.8.8 مرشحات تمرير الحزمة الفعالة

عند الرغبة بتصميم مرشح تمرير حزمة فعّال، من الضروري تحديد ما إذا كان المرشح المطلوب بحزمة تمرير عريضة، أو بحزمة تمرير ضيقة. وكما في المرشحات غير الفعالة إذا كان $\left(\frac{f_2}{f_1} > 1.5\right)$ فإن المرشح المطلوب يكون عريض الحزمة وطبعاً f_2 وf_1 هي ترددات القطع (الـ 3 dB-) للمرشح، وأما إذا كان $1.5 > (f_2/f_1)$ فإن المرشح يُعامل كمرشح تمرير حزمة ضيقة.

يُوصل مرشح تمرير عالٍ مع مرشح تمرير منخفض على التوالي لتكوين مرشح تمرير حزمة عريضة، أما عند الرغبة في تصميم مرشح تمرير حزمةٍ ضيقة فإن هناك طريقة تصميم خاصة سنتعرف عليها لاحقاً.

مثال تصميم مرشح تمرير حزمة عريضة

صمِّم مرشح تمرير حزمة فعَّال له (f_1 = 1000 Hz) وf_2 = 3000 Hz و $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ يساوي على الأقل 30- dB عند الترددات (300 Hz) و(10000 Hz).

الحل:

نوجد نسبة (f_2/f_1) لمعرفة هل المرشح المطلوب تصميمه عريض أم ضيق الحزمة.

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{3000\ Hz}{1000\ Hz} = 3 > 1.5$$

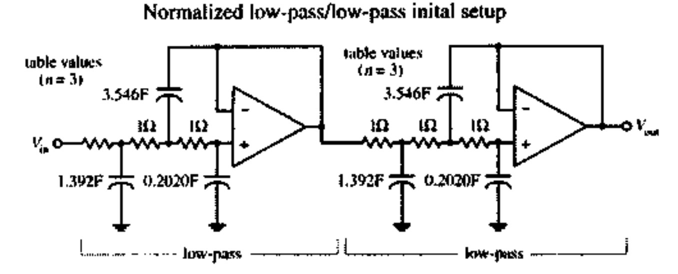
إذن المرشح المطلوب عريض الحزمة ويصمم كمرشحين، الأول تمرير منخفض والثاني تمرير عالٍ يوصلان مع بعض. تحوَّل معطيات تصميم مرشح الحزمة إلى معطيات تصميم مرشح تمرير منخفض ومرشح تمرير عالٍ:

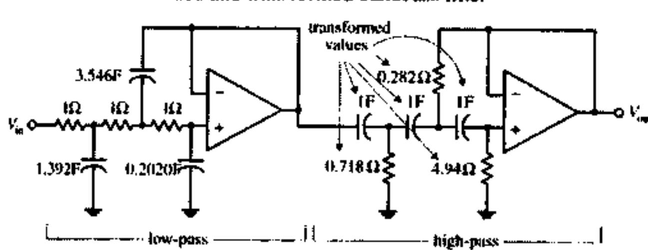
مرشح التمرير المنخفض:

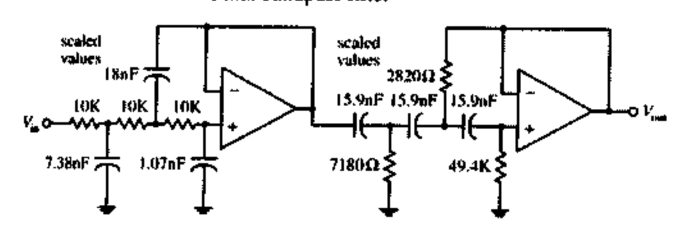
- تردد القطع (f_{3dB}) يساوي 3000 Hz.
- $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ عند التردد 10000 Hz تساوي 30- dB

مرشح التمرير العالي:

- تردد القطع (f_{3dB}) يساوي 1000 Hz.
- $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ عند التردد 300 Hz يُساوي 30- dB







الشكل (18.8): دارات تبيِّن خطوات تصميم مرشح تمرير حزمة عريضة فعَّال.

عامل الانخفاض لمرشح التمرير المنخفض:

$$A_S = \frac{f_S}{f_{3dB}} = \frac{10000\ Hz}{3000\ Hz} = 3.3$$

عامل الانحدار (الانخفاض) لمرشح التمرير العالي:

$$A_S = \frac{f_{3dB}}{f_S} = \frac{1000\ Hz}{300\ Hz} = 3.3$$

وهذا يعني أنَّ ترددات التوقيف المنسوبة للمرشحين متساوية وتساوي (3.3 rad/S). من الشكل (6.8) تُلاحظ أن درجات المرشحات المطلوبة هي (n = 3) وتعطي $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ أفضل من 30- dB عند التردد (3.3 rad/S). ومن أجل إكمال عملية الحصول على المرشحات المنسوبة كرر ما فعلْته في الأمثلة السابقة. تبيِّن أول دارتين في الشكل (18.8) الخطوات اللازمة لذلك. من أجل الحصول على الدارة النهائية للمرشح تُجرى عملية فك نسب ترددية وفك نسب للممانعات.

في مرشح التمرير المنخفض:

$$C_{(actual)} = \frac{C_{(table)}}{Z.2\pi f_{3dB}} = \frac{C_{table}}{Z.2\pi(3000\ Hz)}$$

وفي مرشح التمرير العالي:

$$C_{(actual)} = \frac{C_{(table)}}{Z.2\pi f_{3dB}} = \frac{C_{table}}{Z.2\pi(10000\ Hz)}$$

نختار $Z = 10000\ \Omega$ وتُضرب المقاومات بـــ (Z). الدارة النهائية مبينة في الشكل (18.8).

مثال لمرشح تمرير ضيق

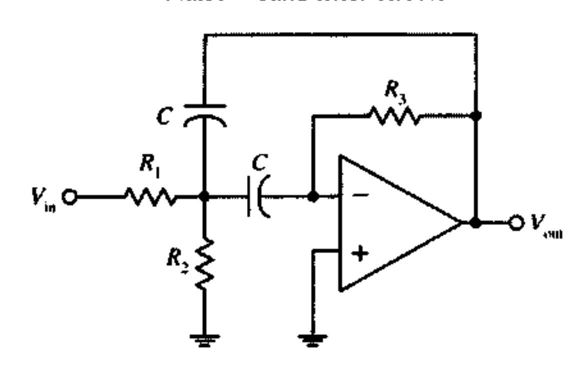
صمِّم مرشح تمرير حزمة له ($f_0 = 2000$ Hz) و $\Delta F_{BW} = f_2 - f_1 = 40$ Hz

الحل:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{2040}{1960} = 1.04 < 1.5$$

ولا يمكن تصميم هذا المرشح كمرشح تمرير عالٍ ومنخفض موصولين مع بعضهما، كما في المثال السابق. هنا يجب استخدام طريقة مختلفة. وفيما يلي نبيِّن طريقة بسيطة لتصميم هذا المرشح، ونستخدم الشكل (19.8) وبعض المعادلات التصميميَّة دون الدخول في التفصيلات.

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{2000\ Hz}{40\ Hz} = 50$$



الشكل (19.8): دارات مرشح تمرير حزمة ضيقة.

استخدم المعادلات التصميميَّة

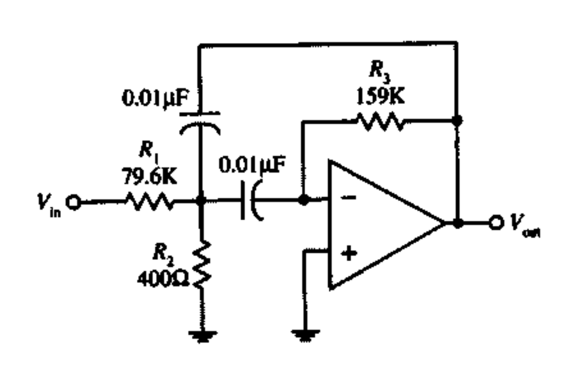
$$R_1 = \frac{Q}{2\pi f_0 C},\ R_2 = \frac{R_1}{2Q^2 - 1};\ R_3 = 2R_1$$

وباختيار قيمة مناسبة للمكثف ولتكن (0.01 µF) تصبح قيم عناصر الدارة

$$R_1 = \frac{50}{2\pi(2000\ Hz)(0.01\mu F)} = 79.6k\Omega$$

$$R_2 = \frac{79.6K\Omega}{2(50)^2 - 1} = 400\ \Omega$$

$$R_3 = 2(79.6K\Omega) = 159\ k\Omega$$



تابع الشكل (19.8): الدارة النهائية لمرشح تمرير الحزمة الضيقة.

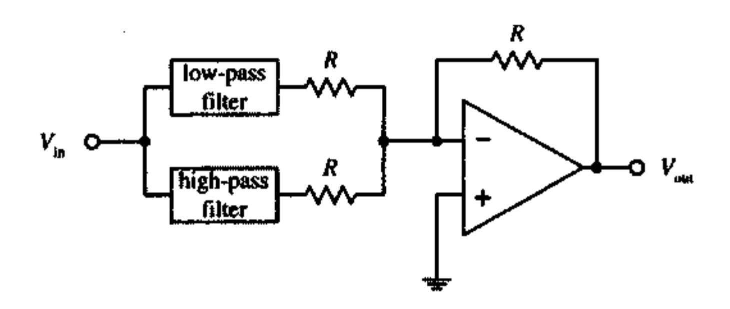
الدارة النهائية مبينة أسفل الشكل (19.8). يُمكن استبدال المقاومة R_2 بمقاومة متغيرة تُضبط على القيمة المطلوبة.

4.8.8 مرشحات حجز حزمة فعالة

تُصنف مرشحات حجز الحزمة الفعّالة أيضاً إلى مرشحات حجز ضيقة الحزمة ومرشحات حجز عريضة الحزمة، وإذا كان ($f_2/f_1 > 1.5$) فإن المرشح يسمى مرشح حجز حزمة عريضة (wide-band notch filter)، أما إذا كان ($f_2/f_1 < 1.5$) فالمرشح يُسمى مرشح حجز حزمة ضيقة narrow-band notch filter).

مثال لمرشح حجز حزمة عريضة

يُوصل مرشح تمرير عالٍ مع مرشح تمرير منخفض لتكوين مرشح حجز حزمة عريضة كما في الشكل (20.8).



الشكل (20.8): طريقة توصيل مرشحات تمرير عالٍ ومنخفض لتكوين مرشح حجز حزمة عريضة.

إذا أردت مثلاً أن تصمم مرشح حجز حزمة له ترددات (‎-3 dB) هي (500 Hz) و(5000 Hz) وفيه $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ تساوي على الأقل ‎15 dB- عند الترددات (1000) و(2500 Hz)، فإنه عليك أن تصمم *مرشح تمرير منخفض له المواصفات*:

- تردد القطع (f_{3dB}) هو 500 Hz
- $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ يساوي ‎15 dB- عند التردد 1000 Hz.

ومرشح تمرير عالٍ له المواصفات:

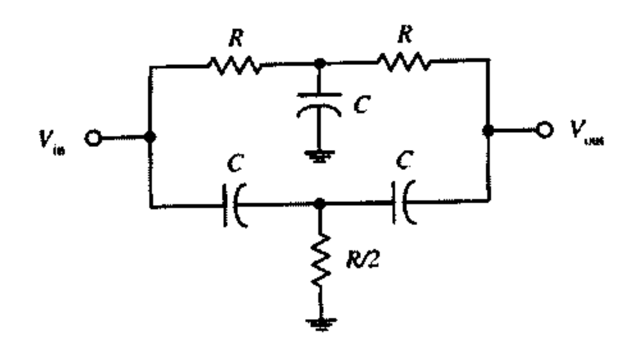
- تردد القطع (f_{3dB}) هو 5000 Hz
- $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|$ يساوي ‎15 dB- عند التردد 2500 Hz.

بعد ذلك إكمال تصميم هذه المرشحات وفق نفس الطرق الواردة سابقاً.

أوصل المرشحين وفق دارة الشكل (20.8)، استخدم R = 10 k في دارة الشكل (20.8).

مثال لمرشح حجز حزمة ضيقة

تُستخدم دارة RC ‏(T مزدوجة) لتصميم مرشح حجز حزمة ضيقة (انظر الشكل 21.8). يمكن الحصول على صفر تمرير عند تردد معيَّن بواسطة هذه الدارة، ولكن Q للدارة هو فقط (1/4)، وتذكر أنّ (Q) لمرشح حجز الحزمة يُعرَّف على أنه نسبة (f_0) التردد المركزي مقسوماً على عرض الحزمة، ومن أجل زيادة عامل الجودة (Q) استخدم دارة مرشح حجز الحزمة الفعَّال المبينة في الشكل (22.8).



الشكل (21.8): دارة (T - مضاعفة) RC.

وسنتعرف هنا، كما في مثال تصميم مرشح تمرير الحزمة، على طريقة حساب قيم عناصر دارة مرشح حجز الحزمة الضيقة من خلال المثال التالي:

صمِّم مرشح حجز حزمة تردده المركزي $f_0 = 2000\ Hz$ و $\Delta f_{BW} = 100\ Hz$ ومن أجل الحصول على الاستجابة المطلوبة عليك القيام بما يلي:

1) احسب Q من العلاقة التالية:

$$Q = \frac{\text{" notch frequency"}}{-3dB\ \text{bandwidth}} = \frac{f_0}{\Delta f_{BW}} = \frac{2000\ Hz}{100\ Hz} = 20$$

تُحسب قيم عناصر الدارة من العلاقات:

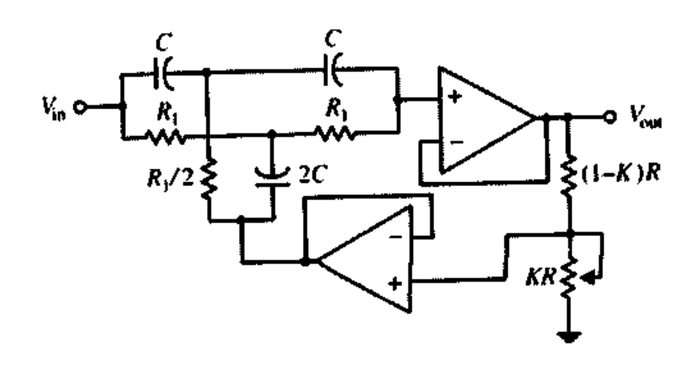
$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_0 C}, K = \frac{4Q-1}{4Q}$$

اختر قيماً لـــ R و C، فمثلاً اختر $R = 10\ k$ و $C = 0.01\ \mu F$، وحل المعادلات بالنسبة لـــ (R_1) و (K).

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{2\pi(2000\ Hz)(0.01\mu F)} = 7961\Omega$$

$$K = \frac{4Q-1}{4Q} = \frac{4(20)-1}{4(20)} = 0.9875$$

تُعوَّض هذه القيم في الدارة، ولاحظ استخدام مقاومة متغيرة في الدارة من أجل الضبط الدقيق (fine-tuning).



الشكل (22.8): دارة مرشح حجز حزمة فعّال.

9.8 دارات المرشحات المتكاملة

توجد في الأسواق هذه الأيام العديد من دارات المرشحات المتكاملة، والصنفان الأساسيان لدارات المرشحات المتكاملة المتوفرة في الأسواق هما المرشحات متغيرة الحالة (state variable) ومرشحات الفصل والوصل (switched capacitor filters)، وطبعاً تتوفر هذه المرشحات كدارات متكاملة ICs.

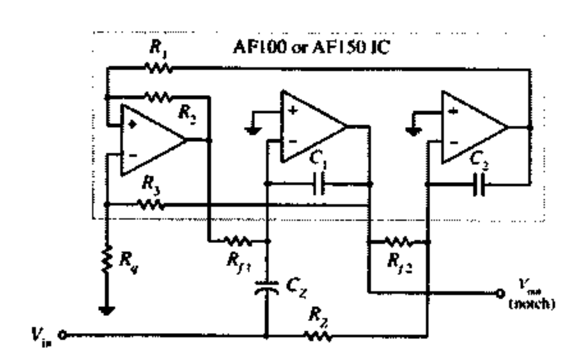
يمكن برمجة نوعي هذه الدارات لتحقيق مرشح من الدرجة الثانية، وعند الرغبة بتصميم مرشح عالي الدرجة توصل عدة دارات متكاملة مع بعضها، وعادة تحتاج لبعض المقاومات الخارجيَّة فقط من أجل برمجة هذه المرشحات.

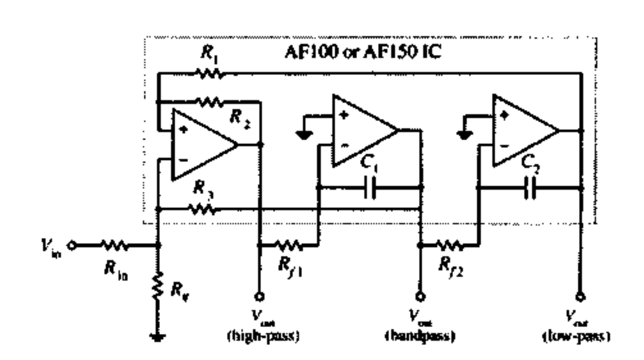
هناك ميزات عديدة لاستخدام دارات المرشحات المتكاملة منها.

- تسهيل عمليات التصميم.
- الدقة العالية.
- كلفة تصميم منخفضة.

وفي أغلب التطبيقات يمكن ضبط عوامل التردد والانتقائية بشكلٍ مستقل.

وكمثال على دارة متكاملة مرشح متغير الحالة نذكر الدارة المتكاملة AF 100 وهي من إنتاج شركة National Semiconductor. يمكن استخدام الدارة كمرشح تمرير منخفض، تمرير عال، تمرير حزمة وحجز حزمة (انظر الشكل 23.8). يُعطي المرشح متغير الحالة ربحاً للجهد، بعكس باقي أنواع المرشحات الفَعالة الواردة سابقاً في هذا الفصل.





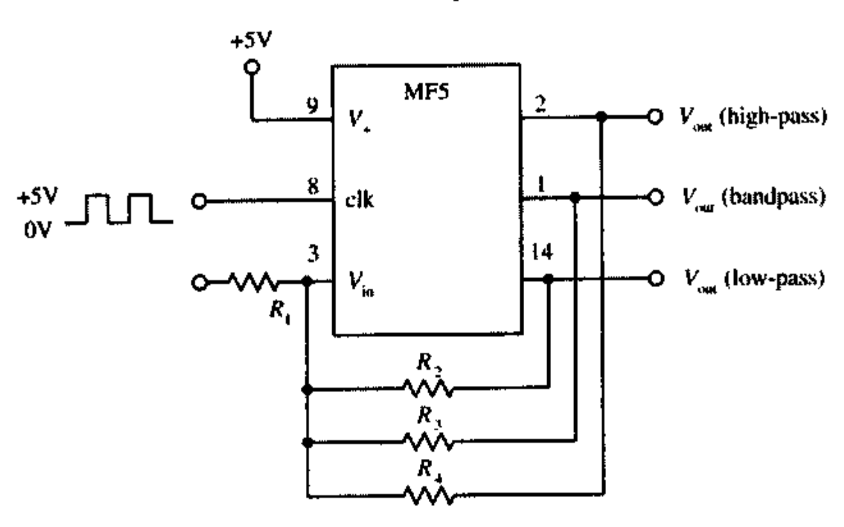
الشكل (23.8): الدارة المتكاملة AF 100.

يُضبط ربح مرشح التمرير المنخفض المبني على دارة AF 100 باستخدام المقاومات (R_1) و(R_{in})، والربح ($gain = -R_1/R_{in}$). أما في مرشح التمرير العالي فيضبط الربح بواسطة (R_2) و(R_{in}) والربح ($gain = -R_2/R_{in}$)، وإشارة الناقص تدل على أن الخرج معكوس بالنسبة للدخل (فرق صفحة 180° بين الخرج والدخل). يعتبر ضبط الربح في مرشحات تمرير الحزمة وحجز الحزمة أكثر صعوبة من حالة مرشحات التمرير المنخفض والعالي.

هناك بارامترات أخرى مثل (Q) مثلاً يمكن حسابها باستخدام علاقات تصميميَّة تعطيها الجهات الصانعة، ويمكن أن تجد دراسة مفصلة ومعادلات تصميمية لها في كتب تصميم المرشحات. ابحث في الكتالوكات الإلكترونية (electronics catalogs) لمعرفة الأنواع الأخرى من الدارات المتكاملة غير AF100 التي تستخدم كمرشحات متغيرة الحالة.

إنّ مرشحات مكثفات الوصل والفصل هي من حيث مبدأ العمل تشبه باقي المرشحات، ولكن وبدلاً من استخدام مقاومات خارجيّة لبرمجة الاستجابة المطلوبة تستخدم في مرشحات مكثفات الوصل والفصل دارة وصل مكثف وفصله (عالية التردد). تعمل دارة وصل المكثف وفصله كمقاومة متغيرة القيمة وتتعلق قيمة المقاومة بتردد خارجي مطبق على

الدارة، وتردد clock الخارجي هو الذي يحدد الترددات المسموح مرورها من دخل المرشح إلى خرجه، وبالتالي أيضاً الترددات التي يُرفض مرورها. تستخدم عادة إشارة clock رقميَّة لقيادة المرشح، وهذه في الواقع ميزة مفيدة إذا كنت تريد تصميم مرشح يمكن التحكم بعمله بواسطة دارات رقميَّة. وكمثال على دارة متكاملة تعمل كمرشح مكثف الوصل والفصل نذكر الدارة المتكاملة MF5 (انظر الشكل 24.8) يمكن ببساطة وباستخدام بضعة مقاومات خارجية، ومصدر تغذيَّة، وإشارة clock، برمجة المرشح كي يعمل كمرشح تمرير منخفض، تمرير عالٍ، أو كمرشح تمرير حزمة. تُعطي الجهات الصانعة لهذه المرشحات العلاقات اللازمة لاختيار المقاومات وتردد clock.



الشكل (24.8): الدارة المتكاملة MF5.

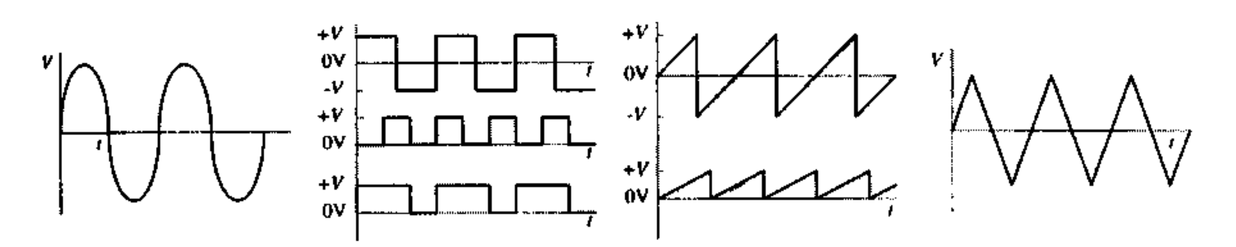
تتوفر مرشحات مكثف الوصل والفصل بدرجات مختلفة، فمثلاً الدارة المتكاملة MF4 هي مرشح بتروورث للتمرير المنخفض درجة رابعة و MF6 هي مرشح تمرير منخفض نوع بتروورث درجة سادسة، الربح في هاتين الدارتين يساوي الواحد في حزمة التمرير، ولا تحتاج هذه الدارات المتكاملة إلى عناصر خارجية ولكنها تحتاج إلى إشارة Clock. توجد أنواع أخرى من مرشحات مكثفات الوصل والفصل ومن إنتاج شركات مختلفة ولمعرفة هذه الأنواع ننصح بمراجعة الكتالوكات (catalogs).

وكملاحظة هامة، نشير إلى أن إشارة clock الدورية المطبقة على مرشح مكثف الوصل والفصل، يمكن أن تولد مقدراً لابأس به من الضجيج (من 10 إلى 25 mV) في إشارة الخرج، ولكن هذا الضجيج ليس موضع اهتمام، وذلك لأن تردد الضجيج، والذي هو من مرتبة ترددات إشارة Clock، بعيد عن تردد الإشارة المفيدة. ويمكن ببساطة وباستخدام دارة RC بسيطة التخلص من هذا الضجيج.



الهزازات والمؤقتات

يوجد تقريباً هزاز من نوع ما في كل جهاز إلكتروني، ووظيفة الهزاز في دارة ما هي توليد موجة تكرارية بشكل معيَّن (shape)، وتردد (frequency) محدَّد ومطال (amplitude) كافٍ لقيادة الدارات الأخرى. وحسب التطبيقات وطبيعتها فإن الهزاز يمكن أن يكون هزازاً نبضياً، أو جيبياً (sinusoidal) أوّ يُعطي موجات مربعة (square waves)، أو سن منشارية (saw tooth) أو مثلثية (triangular) كما في الشكل (1.9).



الشكل (1.9) أشكال الإشارات التي يمكن توليدها بواسطة هزازات.

تسمى مولدات الإشارات (الموجات) المربعة في الإلكترونيات الرقمية باسم مولدات نبضات الساعة ويُطلق عليها اختصاراً اسم (Clocks) وتستخدم هذه النبضات كخانات قيادة (drive bits) للمعلومات عبر البوابات المنطقية (Logic gates) والقلابات (flip-flops) بمعدَّل سرعة يتحدد بتردد نبضات clock. تستخدم الهزازات الجيبيَّة لتوليد الموجات الحاملة في تجهيزات الاتصالات اللاسلكية ويتم تحميل إشارات المعلومات على الموجات الحاملة في عملية التعديل (modulation)، فعملية التعديل إذاً تحتاج إلى موجة حاملة يولدها هزاز. يستخدم مولد موجات سن منشارية في رواسم الإشارة (oscilloscopes) لتوليد مسح إلكتروني أفقي يعمل كقاعدة زمنية. تستخدم الهزازات في دارات مشكلات التردد (Synthesizer circuits)، وفي دارات العدادات والمؤقتات، وفي دارات المصابيح والديودات المصدرة للضوء الومّاضة (flash lamp/LED)، وفي تطبيقات أخرى عديدة لا تنتهي.

إن عملية تصميم هزاز جيد ليست سهلة ويمكن أن تكون معقدة، فهناك عدد لا بأس به من الأنواع إضافة إلى وجود تقنيات تصميم دقيقة مختلفة، وأنواع التصميم تعتمد على طبيعة الدارة المستخدمة لتوليد الاهتزاز فهناك دارات تهتز بسبب عناصر RC (شحن وتفريغ) ودارات تهتز بسبب وجود دارات طنين LC فيها أو بسبب كريستالات (Crystals) وكل نوع من هذه الهزازات يناسب تطبيقات معينة. يمكن تصميم بعض أنواع الهزازات بسهولة، ولكن استقرارها الترددي منخفض، أما في بعض الأنواع الأخرى فيمكن الحصول على استقرارية تردديَّة جيدة في مجال ما من الترددات، ولكن هذه

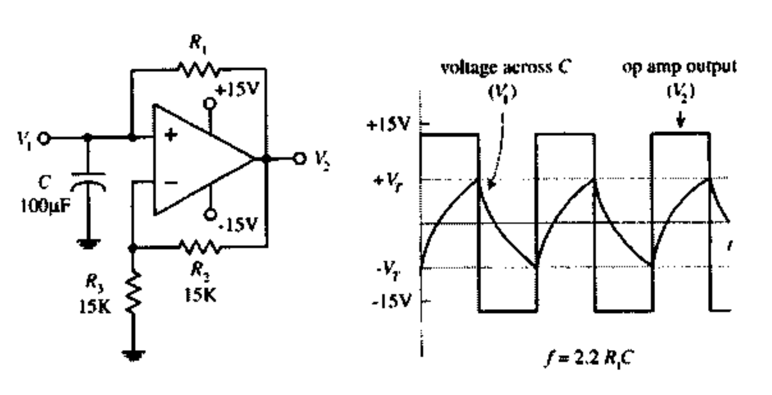
الاستقرارية تنخفض خارج هذا المجال. طبعاً يجب أن يؤخذ شكل الموجة المطلوب بالاعتبار عند تصميم الهزاز. يناقش هذا الفصل الأنواع الأساسية للهزازات كهزازات الاسترخاء (RC) (RC-Relaxation oscillators)، وهزاز جسر فين، وهزاز LC، والهزاز الكريستالي، كما تُعطى في هذا الفصل أيضاً فكرة عن دارات الهزازات المتكاملة شائعة الاستخدام (Oscillator ICs).

1.9 هزازات الاسترخاء

ربما يكون هزاز الاسترخاء RC من أسهل أنواع الهزازات تصميمياً.

ويمكن شرح طبيعة هذا الهزاز الاهتزازية وفق المبدأ التالي:

يُشحن المكثف عبر مقاومة ثم يُفرَّغ المكثف بسرعة عندما يصل جهد المكثف إلى جهد عتبة معيَّن، وبعد ذلك تتكرر دورة العمل هذه باستمرار.



الشكل (2.9): دارة هزاز استرخاء وأشكال موجات جهدها.

يستخدم مضخم عملياتي مع تغذية عكسية موجبة للتحكم بدورة شحن وتفريغ المكثف، ويعمل المضخم العملياتي كمفتاح شحن وتفريغ ويقدح بواسطة جهد العتبة (threshold voltage) وكذلك يؤمن المضخم الربح اللازم لعملية الاهتزاز. يبيِّن الشكل (2.9) دارة هزاز استرخاء بسيطة.

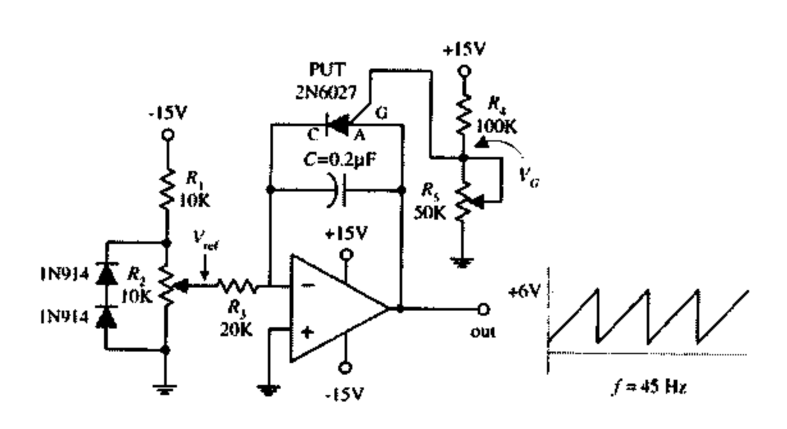
بفرض أن خرج المضخم العملياتي قد انتقل إلى الإشباع الموجب عند وصل التغذية إلى الدارة (لا يوجد فرق إذا فرضنا أن الخرج ينتقل إلى الإشباع السالب لحظة وصل التغذية ـــ راجع الفصل السابع لمعرفة التفاصيل)، عند ذلك يبدأ المكثف بالشحن باتجاه جهد التغذية الموجب للمضخم العملياتي (حوالي 15 V+) بثابت زمني يساوي (R_1 C)، وعندما يصل الجهد على المكثف إلى جهد عتبة المضخم العملياتي، فإن خرج المضخم العملياتي يقفز فجأة إلى جهد الإشباع السالب (حوالي 15 V-). جهد العتبة هو الجهد المتكون على المدخل العاكس للمضخم العملياتي.

$$V_T = \frac{R_3 V_S}{R_3 + R_2} = \frac{15k\Omega}{15k\Omega + 15k\Omega}(+15V) = +7.5V$$

وعندما ينتقل خرج المضخم العملياتي إلى جهد الإشباع السالب يصبح (V_T = -7.5 V)، ويبدأ المكثف بالتفريغ باتجاه الإشباع السالب بثابت زمني يساوي (R_1 C) وعندما يصل جهد المكثف إلى (-7.5 V) يعود خرج المضخم العملياتي إلى جهد الإشباع الموجب، وتتكرر دورة العمل هذه بشكل دائم بدور T = (2.2) R_1 C.

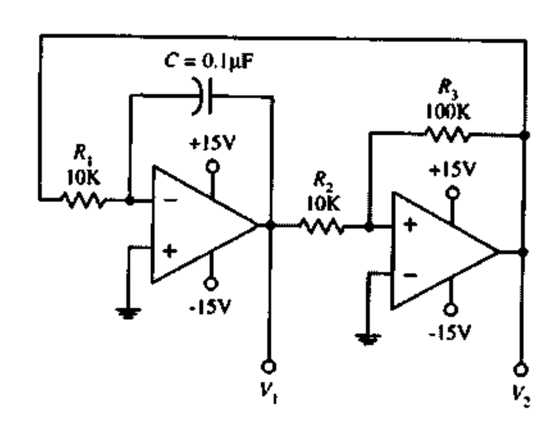
في الشكل (3.9) تُعطى دارة هزاز استرخاء آخر تولد موجة سن منشارية. هذه الدارة تشبه دارة مكامل يعمل على مضخم عملياتي مع وجود PUT (ترانزستور وحيد المتصل قابل للبرمجة) في حلقة التغذية العكسيّة. الـ PUT هو المكوِّن الرئيسي في الدارة والذي يجعل الدارة تهتز.

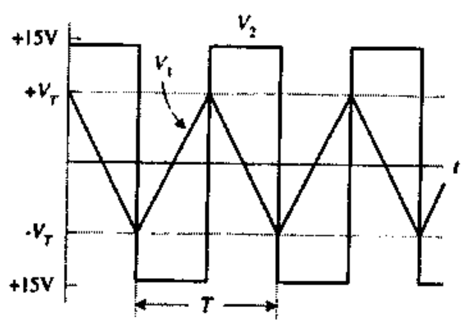
وفيما يلي شرح لآلية عمل الدارة.



الشكل (3.9): دارة هزاز استرخاء تولد موجة سن منشارية.

لنفرض بدايةً أن الدارة لا تحوي PUT، عندها تشبه الدارة دارة مكامل بسيطة. عند تطبيق جهد سالب على المدخل العاكس (-) فإن المكثف يشحن بمعدَّل خطي باتجاه جهد الإشباع الموجب (+15 V) وتكون إشارة الخرج عبارة عن جهد خطي متزايد ولا يتولد جهد سن منشاري تكراري. ومن أجل توليد الموجة السن منشارية نضيف الـــ PUT إلى الدارة كما في الشكل (3.9) ويعمل الـــ PUT كمفتاح فعَّال يكون في حالة (on) ويمر التيار فيه من المصعد إلى المهبط عندما يكون الجهد بين المصعد والمهبط أكبر من جهد البوابة. يبقى الـــ PUT في حالة on حتى ينخفض التيار المار فيه إلى قيمة أقل من تيار المسك (holding current). إن عمل الـــ PUT كمفتاح يسمح بالتفريغ السريع للمكثف قبل أن يصل الخرج إلى الإشباع، ينتقل الـــ PUT إلى القطع وتتكرر الدورة. يتم ضبط جهد بوابة الـــ PUT بواسطة مقسِّم جهد (R_4)، (R_5)، أما المقاومات (R_1) و(R_2) فإنها تضبط الجهد المرجعي على المدخل العاكس (-) للمضخم العملياتي.





الشكل (4.9): مولد موجة مثلثية وأشكال الجهود في الدارة.

تستخدم الديودات لتثبيت الجهد على المقاومة (R_2)، عند تغييرها من أجل ضبط التردد. يتحدد مطال الخرج بالمقاومة R_4 أما تردد إشارة الخرج فيعطى بالعلاقة التقريبيَّة

$$f \cong \frac{V_{ref}}{R_3 C}\left(\frac{1}{V_P - 0.5V}\right)$$

والـــ (0.5 V) في هذه المعادلة يمثل هبوط الجهد التقريبي على الـــ PUT.

في الشكل (4.9) تُعطى دارة تحوي مضخمين عملياتيين وتولد موجة مثلثية وموجة مربعة. تتكون هذه الدارة من مولد موجة مثلثية ومقارن.

يعمل المضخم العملياتي اليميني الموجود في الدارة كمقارن مع وجود تغذية عكسية ولذلك فإن أقل فرق بين جهود المداخل يجعل خرج المقارن ينتقل إلى الإشباع الموجب أو السالب (حسب إشارة الفرق) وبفرض أن خرج المقارن كان في حالة الإشباع الموجب فإنه يبقى على هذه الحالة حتى ينخفض الجهد على المدخل غير العاكس (+) إلى قيمة أدنى من جهد العتبة السالب ($-V_T$) وفقط عند تلك اللحظة ينتقل V_2 إلى الإشباع السالب.

يُعطى جهد الإشباع بالعلاقة:

$$V_T = \frac{V_{sat}}{R_3 - R_2}$$

V_{sat}: جهد الإشباع وهو عادة أقل بحوالي (1 V) من جهد التغذية. يعمل المقارن مع مولد الجهد التصاعدي (المضخم العملياتي اليساري).

وخرج هذا المضخم موصول مع المدخل غير العاكس للمقارن وتوجد تغذية عكسية من خرج المضخم العملياتي اليساري إلى دخله، وفي كل لحظة يصل فيها جهد خرج مولد الجهد التصاعدي إلى قيمة تساوي جهد العتبة فإن المقارن يغيِّر خرجه وبذلك ينشأ اهتزاز في الدارة. يتحدد دور إشارة الخرج والإشارة المربعة بالثابت الزمني (R_1C) وبجهد الإشباع وبجهد العتبة.

$$T = \frac{4V_T}{V_{sat}} R_1C; f = \frac{1}{T}$$

طبعاً ليست المضخمات العملياتية هي العناصر الفعالة الوحيدة التي يمكن استخدامها في تشكيل هزازات استرخاء ويمكن لعناصر إلكترونية أخرى كالترانزستورات والبوابات المنطقية الرقمية (digital logic gates) أن تقوم بعملها.

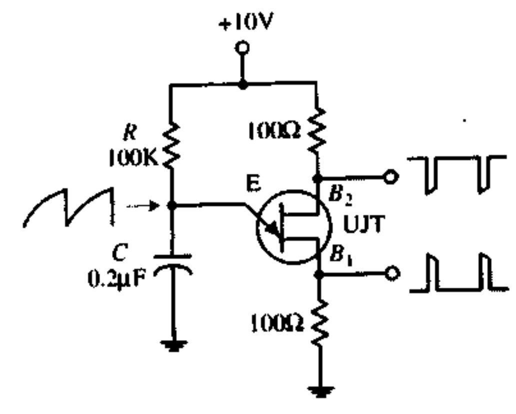
تبيِّن الدارة المعطاة في الشكل (5.9) ترانزستور (UJT) وحيد المتصل مع بعض المقاومات ومكثف، وتكون هذه العناصر هزاز استرخاء يولد أشكالاً مختلفة من الموجات.

خلال العمل يُشحن المكثف (C) عبر المقاومة (R) وعندما يصل جهد المكثف المطبق على الباعث إلى جهد قدح الترانزستور ويتجاوزه بقليل تزداد ناقلية المنطقة ($E\text{-}B_1$) بشكلٍ حاد ومفاجئ ويسمح بمرور تيار من المكثف عبر المنطقة ($E\text{-}B_1$) إلى المقاومة (100 Ω) إلى الأرض وبذلك يبدأ المكثف بتفريغ شحنته وبتخفيض جهد الباعث فجأة إلى ما دون جهد القدح وتعود الدورة للتكرار. تُبيِّن على الشكل أشكال الموجات التي يتم توليدها أثناء العمل، ويُعطى تردد الاهتزاز بالعلاقة:

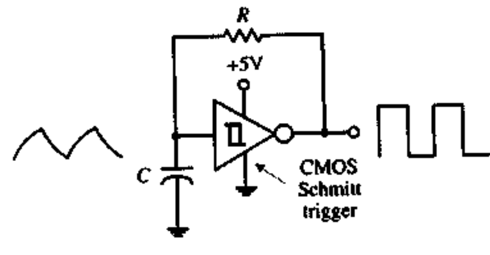
$$f = \frac{1}{R_E C_E \ln[1/(1-\eta)]}$$

η: هي نسبة التعادل الداخلي (intrinsic stand off) للترانزستور وحيد المتصل وقيمتها التقريبيَّة (0.5). انظر الفصل الرابع لمعرفة المزيد من التفاصيل.

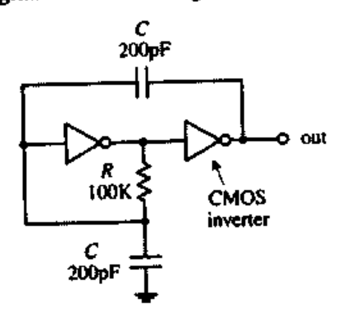
تبيِّن دارة الشكل (5.9) هزاز استرخاء آخر مبنياً على بوابة عاكس تعمل كقادح شميت (Schmitt trigger inverter) ويحوي مقاومة (R) ومكثفاً (C)، تستخدم قوادح شميت لتحويل التغيرات الجهدية البطيئة في الدخل إلى تغيرات حادة جداً (سريعة) وحالية من الاهتزازات في الخرج. عند تطبيق الجهد في اللحظة الأولى على الدارة يكون جهد المكثف صفراً وخرج العاكس (+5 V) ويشحن المكثف عبر R باتجاه الجهد (+5 V) ولكن وعند وصول جهد المكثف إلى جهد العتبة الموجب (حوالي 1.7 V)، فإن جهد خرج العاكس ينتقل إلى الصفر ويفرِّغ المكثف عبر (R) إلى الصفر.



Digital oscillator
(using a Schmitt trigger inverter)



Digital oscillator (using inverters)



الشكل (5.9): UIT كهزاز استرخاء.

وعندما ينخفض جهد المكثف إلى ما دون جهد العتبة السفلي (حوالي 0.9 V) يعود خرج العاكس إلى حالة high وتتكرر الدورة. تتحدد أزمنة الـــ (on/off) بجهود العتبة عند الانتقال وبالثابت الزمني RC.

في الدارة الأخيرة من الشكل (5.9) يُستخدم زوج عواكس CMOS لتكوين هزاز استرخاء RC بسيط يُعطي موجة مربعة. يمكن أن تعمل هذه الدارة من جهود تغذية تتراوح بين (4) و(18 V)، ويُعطى تردد الاهتزاز بالعلاقة:

$$f = \frac{1}{4\pi\sqrt{2}RC}$$

يمكن استخدام مقاومة متغيرة لضبط التردد. سوف نناقش عواكس CMOS في الفصل الثاني عشر.

كافة هزازات الاسترخاء المبينة في هذه الفقرة سهلة التركيب والبناء.

سنبيِّن الآن أن هناك طريقة أسهل لتوليد الإشارات وتعتمد هذه الطريقة على استخدام دارات متكاملة ICs مصممة خصيصاً لهذا الغرض. والدارة المتكاملة (555) هي دارة شائعة الاستخدام ويمكن الحصول منها على نبضات مربعة بوصل مقاومات خارجية ومكثف معها.

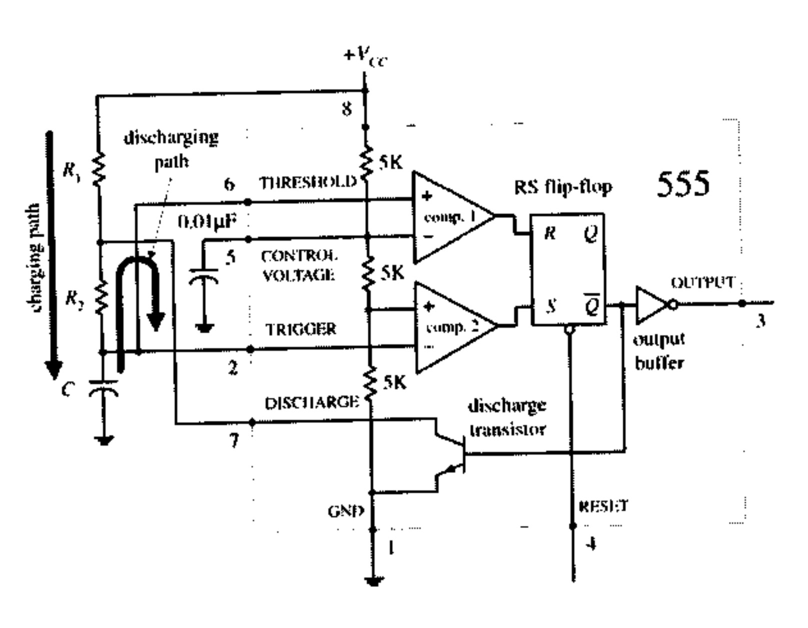
2.9 دارة المؤقت المتكاملة 555

الدارة 555 هي دارة مؤقت دقيقة ومفيدة ويمكن استخدامها إما كهزاز أو مؤقت. عند تشغيل الدارة في نمط المؤقت والمعروف باسم النمط وحيد الاستقرار (monostable mode) فإن الدارة 555 تعمل كمؤقت وحيد الإطلاق (one-shot timer)، فعند تطبيق جهد قدح على طرف القدح للدارة فإن خرج الدارة المتكاملة ينتقل إلى حالة (high) ويستمر على ذلك الوضع لفترة زمنيَّة تتعلق بالمقاومة (R) والمكثف (C). في نمط العمل كهزاز والمعروف بالنمط عديم الاستقرار (astable mode) فإن الدارة تعمل كمولد نبضات مربعة، ويتم ضبط هذه النبضات (التردد، زمن استمرارية حالة high، زمن استمرارية حالة Low) بواسطة دارتي RC للشحن والتفريغ. إن الدارة 555 سهلة الاستخدام ورخيصة السعر ويمكن استخدامها في عدد كبير جداً من التطبيقات (تحتاج عند استخدام الدارة لبعض المقاومات والمكثف، وطبعاً لجهد تغذية). يمكن بواسطة الدارة 555 توليد نبضات clock، وتكوين وبناء دارات أضواء ومَّاضة، وتشكيل دارات مولدات نغمات (وصافرات وغيرها)، كما يمكن استخدامها أيضاً كمؤقت وحيد الإطلاق ومفتاح عديم الارتداد وكمولد موجة مربعة وكمقسم تردد وفي غيرها من التطبيقات.

1.2.9 كيف تعمل الدارة 555، العمل كعديم استقرار

الشكل (6.9) هو عبارة عن مخطط صندوقي مبسَّط يبيِّن البنية الداخلية الدارة 555، ويبيِّن الدارة الكلية (مع العناصر الخارجيَّة) لمهتز عديم الاستقرار.

أخذت الدارة 555 تسميتها من المقاومات الداخلية الثلاث والتي قيمة كل واحدة منها 5 kΩ وتعمل هذه المقاومات كمقسِّم جهد بين منبع الجهد والأرض. توصل النقطة العلوية للمقاومة 5 kΩ السفلية إلى المدخل غير العاكس للمقارن (2) وقيمة جهد هذا المدخل تساوي ($V_{CC}/3$)، أما النقطة العلوية للمقاومة 5 kΩ الوسطى فموصولة إلى المدخل العاكس للمقارن الأول وقيمة جهد هذه النقطة ($2\ V_{CC}/3$). تتعلق وضعيات مخارج المقارنين (high) أو (Low) بالجهود التشابهية المطبقة على مداخلها. إذا كان جهد الدخل غير العاكس لأحد المقارنات أكثر إيجابية من جهد المدخل الآخر فإن المستوى المنطقي لخرج المقارن سيكون (high)، وإذا كان جهد المدخل غير العاكس للمقارن أقل إيجابية من جهد المدخل العاكس فإن خرج المقارن يكون على حالة (Low). تطبق مخارج المقارنات (1) و(2) على مداخل قلاب (RS) بسيط. يُعطي القلاب RS في خرجه حالة high أو (Low) حسب وضعيات المداخل (R) و(S). انظر الفصل الثاني عشر. سنتعرف فيما يلي على وظائف أرجل الدارة 555.



الشكل (6.9): دارة مهتز عديم الاستقرار.

الرجل (1): أرضي (Ground).

الرجل (2): مدخل قدح، وهي عبارة عن نقطة موصولة مع المدخل العاكس للمقارن الثاني وتستخدم لنقل القلاب (RS) إلى حالة وضع (Set) أي خرج (high) وذلك عند انتقال الجهد على الرجل من قيمة عالية إلى قيمة أقل من $\left(\frac{1}{3}V_{CC}\right)$، حيث ينتقل خرج المقارن (2) إلى (high) وتصبح S = high وخرج القلاب (high). تسمى الرجل (2) trigger input.

الرجل (3): طرف الخرج (output). يقاد خرج الدارة 555 بعازل عاكس قادر على إعطاء أو امتصاص تيار (200 mA). يتعلق مستوى جهد الخرج بتيار الخرج ولكنه وبشكلٍ عام يُعطي القيم التقريبيّة التالية:

$V_{out\,(high)} = V_{CC} - 1.5\ V$

$V_{out\,(low)} = 0.1\ V$

الرجل (4): رجل تصفير (reset) وهي فعّالة في حالة Low وتجبر هذه الرجل عند وصلها مع جهد Low الخرج $\overline{Q}$ للقلاب RS على الانتقال إلى high والخرج Q على الانتقال إلى حالة Low وبالتالي ينتقل خرج الدارة إلى حالة (Low).

الرجل (5): رجل تحكم (Control). تستخدم هذه الرجل لرفع جهد المدخل العاكس للمقارن الأول إلى قيمة أعلى من $\frac{2V_{CC}}{3}$ عند الحاجة، ولكنها تؤرض عبر مكثف (0.01 µF) ويساعد المكثف على إزالة ضجيج مصدر التغذية Vcc وبوصل منبع جهد إضافي مع هذه الدارة تتغير مستويات القدح.

الرجل (6): وهي المدخل غير العاكس للمقارن الأول وتسمى رجل العتبة (threshold) ويستخدم جهد هذا المدخل لتصفير خرج القلاب RS عندما يتجاوز جهد الرجل (6) الجهد $\left(\frac{2V_{CC}}{3}\right)$، أما عندما ينخفض جهد الرجل (6) عند (2 Vcc/3) فإن خرج المقارن الأول يكون (Low).

الرجل (7) تفريغ (discharge). هذه الرجل موصولة مع مجمع ترانزستور نوع npn. ويستخدم هذا الترانزستور لقصر النقطة (7) إلى الأرض وذلك عندما تكون $\overline{Q}$ على حالة (high) أو الخرج (3) على وضع (Low)، ويؤدي ذلك إلى تفريغ المكثف.

الرجل (8) مصدر جهد التغذية Vcc. تتراوح قيمة جهد التغذية عادة بين (4.5) و(16) فولت في المؤقتات متعددة الاستخدامات أما في المؤقتات 555 نوع CMOS فيمكن أن يكون جهد التغذية أخفض من ذلك ويمكن أن يصل إلى (1 V).

عند تطبيق التغذية على دارة المهتز عديم الاستقرار تكون المكثفة غير مشحونة ويكون الجهد المطبق على الرجل (2) مساوياً الصفر ويكون خرج المقارن (2) في حالة (high) وهذا يؤدي إلى جعل $\overline{Q} = Low$ وخرج الدارة 555 في حالة High وترانزستور التفريغ في حالة قطع مما يسمح بشحن المكثف (C) عبر المقاومات R_1 وR_2 باتجاه جهد المصدر Vcc.

وعندما يصل جهد المكثف إلى قيمة أكبر بقليل من $\left(\frac{1}{3}V_{CC}\right)$ فإن خرج المقارن (2) ينتقل إلى حالة Low ولا يكون لهذا الانتقال تأثير على خرج القلاب RS ولكن وعندما يزيد جهد المكثف عن (2 Vcc/3) فإن خرج المقارن الأول ينتقل إلى

حالة (High) ويصفر خرج القلاب RS أي ينتقل خرج الدارة إلى حالة Low والخرج $\overline{Q}$ إلى حالة high وينتقل ترانزستور التفريغ إلى الإشباع ويفرِّغ المكثف عبر R_2 والترانزستور إلى الأرض.

وعند انخفاض جهد المكثف إلى قيمة أقل من $\left(\frac{1}{3}V_{CC}\right)$ يعود خرج المقارن (1) إلى حالة (high) ويتم وضع خرج القلاب RS مرة جديدة على حالة High و $\overline{Q}$ على حالة Low ويقطع ترانزستور التفريغ مما يسمح للمكثف بإعادة الشحن وهكذا تتكرر دورة العمل بشكل دائم. نحصل في خرج الدارة على نبضات مربعة بمستوٍ يساوي (V_{CC} - 1.5 V) وتتحدد أزمنة (on) و(off) لجهد الخرج بالمكثف (C) وبالمقاومات (R_1) و(R_2).

2.2.9 الدارة الأساسية لعديم الاستقرار

عند توصيل دارة 555 للعمل كعديم استقرار، فإن الدارة لن يكون لها حالة استقرار وإنما يقفز الخرج من حالة إلى حالة. يبقى الخرج على حالة (Low)، أي حوالي (0.1 V) لفترة تتحدد بالثابت الزمني (R_2 C) ومستويات $\left(\frac{1}{3}V_{CC}\right)$ و$\left(\frac{2}{3}V_{CC}\right)$، أما زمن بقاء الخرج على حالة high، أو (V_{CC} - 1.5 V) فيتحدد بالثابت الزمني (R_1 + R_2) C وبمستويات جهود العتبات (انظر الشكل). يمكن بإجراء دراسة تحليلية للدارة الحصول على العلاقات التالية:

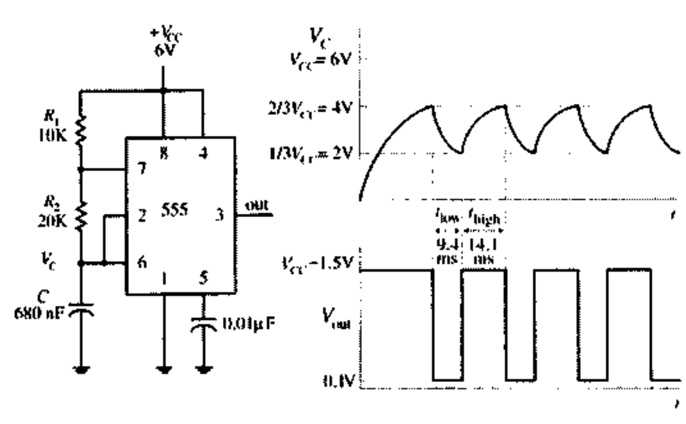
$$t_{(Low)} = 0.69\ R_2\ C$$
$$t_{(high)} = 0.69\ (R_1 + R_2)\ C$$

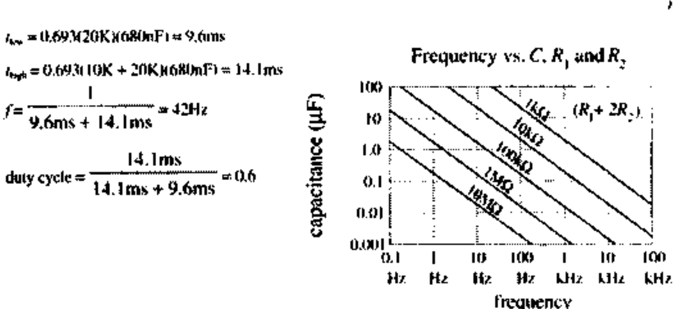
تُعطى دورة المشغولية (هي الفترة من الدور التي يكون فيها الخرج high) بالعلاقة التالية:

$$Duty\ Cycle = \frac{t_{(high)}}{t_{(high)} + t_{(Low)}}$$

أما تردد الاهتزاز فيعطى بالعلاقة:

$$f = \frac{1}{t_{(high)} + t_{(Low)}}$$





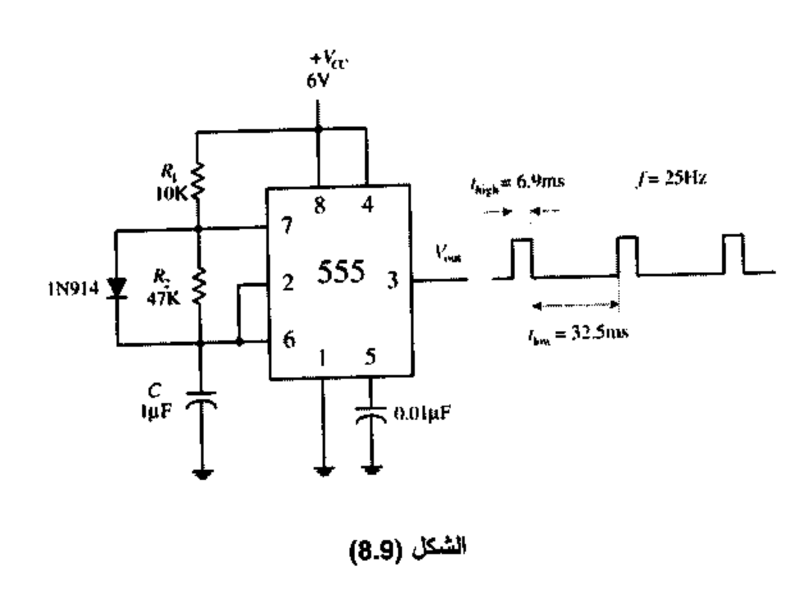
الشكل (7.9): الدارة الأساسية لعديم الاستقرار

من أجل ضمان موثوقية العمل يجب أن تكون قيم المقاومات بين 10 KΩ و14 MΩ أما مكثف التوقيت فيجب أن يكون بين 100 pF و1000 μF وتبيِّن المخططات العلاقة بين التردد وقيم العناصر.

دارة عديم استقرار تعطي نبضات ذات دورة مشغولية صغيرة

لا يمكن في الدارة السابقة الحصول على نبضات بدورة مشغولية أقل من (0.5) أو (50 %) أي لا يمكن جعل $t_{(high)}$ أقل من $t_{(Low)}$ ولكي نحقق ذلك يجب أن يُصبح $R_1 C > (R_1 + R_2) C$ وبالطبع لا يمكن تحقيق ذلك رياضياً. يوصل ديود على طرفي R_2 وعندما يكون المكثف في حالة شحن فإن الديود يكون (on) ويقصر المقاومة (R_2) ويصبح ثابت الشحن مساوياً R_1 C وبذلك فإنّ أزمنة (high) و(Low) تصبح:

$$t_{(high)} = 0.693(10k\Omega)(1\mu F) = 6.9mS$$
$$t_{(Low)} = 0.693(47k\Omega)(1\mu F) = 32.5mS$$
$$f = \frac{1}{6.9mS + 32.5mS} = 25Hz$$
$$\text{duty cycle} = \frac{6.9mS}{6.9mS + 32mS} = 0.18$$
$$t_{high} = 0.693R_1C;\ t_{(Low)} = 0.963R_2C$$



الشكل (8.9)

إذن لتوليد موجات مربعة بدورة مشغولية أصغر من (0.5) يتم وصل ديود على التوازي مع (R_2) واختيار R_1 أصغر من R_2.

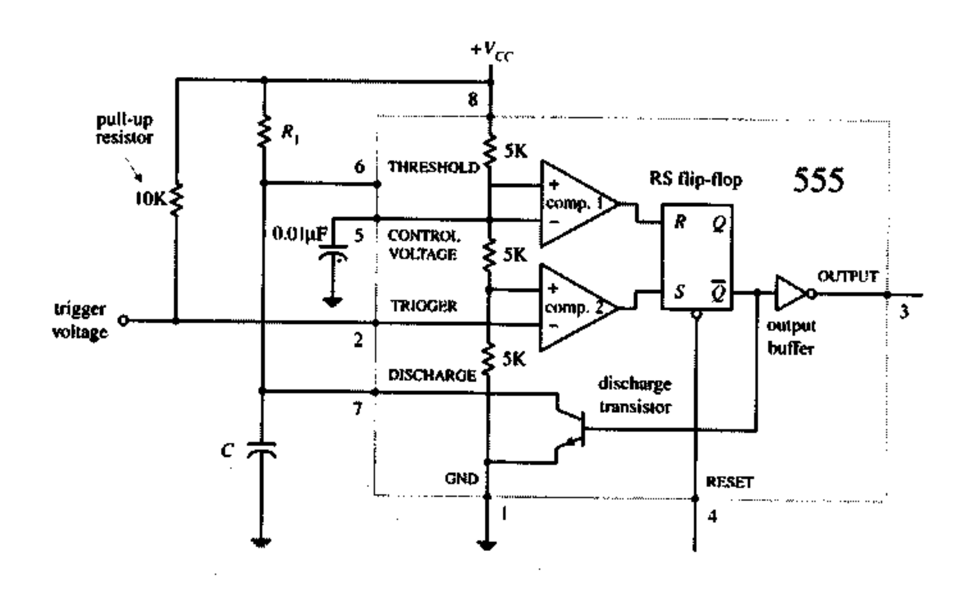
3.2.9 كيف تعمل الدارة 555 كوحيد استقرار

يبيِّن الشكل (9.9) دارة 555 موصولة للعمل كوحيد استقرار (مهتز وحيد الإطلاق) ولهذه الدارة حالة استقرار وحيدة (بعكس دارة عديم الاستقرار)، وهذا يعني أن الخرج يغيِّر حالته عند تطبيق إشارة قدح خارجية على الدارة ويبقى على الحالة الجديدة فترة من الزمن ثم يعود من تلقاء نفسه إلى حالة الاستقرار.

في الحالة الابتدائية لدارة وحيد الاستقرار وقبل تطبيق نبضة قدح يكون خرج الدارة 555 على حالة (Low) ويكون ترانزستور التفريغ في حالة (on) وتُقصر بذلك الرجل (7) إلى الأرض، مما يجعل المكثف (C) غير مشحون.

عادة يكون جهد النقطة (2) في حالة (high) عن طريق وصلها بواسطة مقاومة شد (10 kΩ) إلى $+V_{CC}$. عند تطبيق نبضة قدح سالبة (جهدها أقل من $\left(\frac{1}{3}V_{CC}\right)$ على الرجل (2) يجبر خرج المقارن (2) على الانتقال إلى حالة (high) مما يجعل مخارج القلاب RS كما يلي $(Q = high, \overline{Q} = Low)$ ويؤدي ذلك إلى قطع ترانزستور التفريغ ويسمح للمكثف بالشحن من مصدر التغذية عبر R_1، طبعاً يكون خرج الدارة في حالة (high).

عندما يصل جهد المكثف إلى $\left(\frac{3}{2}V_{CC}\right)$. يصبح خرج المقارن الأول (high) ويصفر القلاب RS أي يصبح $Q = Low$ و $\overline{Q} = high$ وينتقل ترانزستور التفريغ إلى حالة (on) ويفرِّغ المكثف ويبقى الخرج (Low) على هذه الحالة المستقرة حتى تطبيق نبضة قدح تالية.



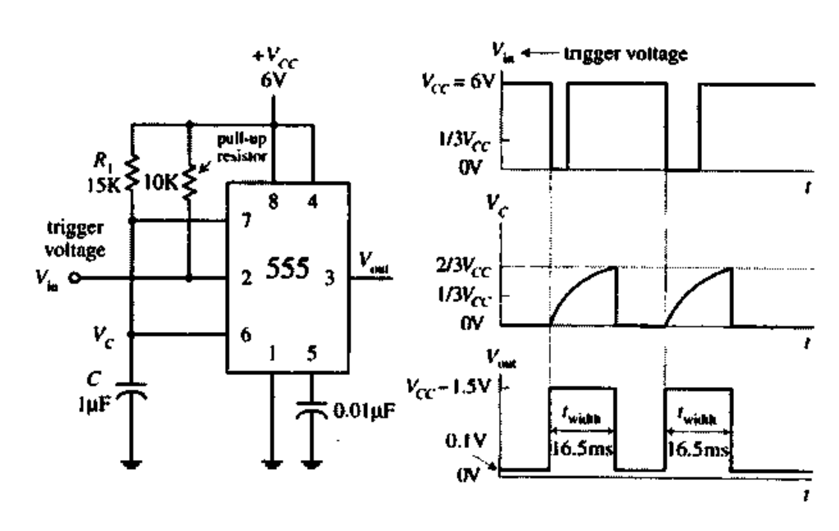
الشكل (9.9): دارة 555 كمهتز وحيد الاستقرار.

4.2.9 الدارة الأساسية لوحيد الاستقرار

لدارة وحيد الاستقرار حالة استقرار وحيدة، وهي الحالة التي يكون فيها الخرج على حالة Low (حوالي 0.1 V تقريباً) وتستمر هذه الحالة حتى لحظة تطبيق نبضة قدح سالبة على الرجل (2)، (ويمكن تحقيق هذه النبضة عن طريق قصر النقطة (2) لحظياً إلى الأرض مثلاً)، في لحظة القدح ينتقل الخرج إلى حالة (high)، جهد الخرج high يساوي تقريباً (V_{CC} - 1.5 V) ويبقى الخرج على وضعية high لفترة زمنية تتعلق بالثابت الزمني R_1 C، وتُعطى علاقة عرض نبضة الخرج بالمعادلة التالية

$$t_{(width)} = (1.1)\ R_1\ C$$

من أجل ضمان موثوقية العمل يجب أن تكون (R_1) بين 10 kΩ و14 MΩ، أما المكثف C فيجب أن يكون بين 100 pF و1000 μF.



الشكل (10.9): الدارة الأساسية لوحيد الاستقرار.

5.2.9 بعض الملاحظات الهامة عن المؤقتات 555

تتوفر دارات 555 من أنواع ثنائية القطبيَّة وCMOS. في دارات 555 ثنائية القطبيَّة توجد ترانزستورات ثنائية القطبيَّة في البنية الداخلية لدارة 555 أما في الدارات 555 نوع CMOS فتوجد ترانزستورات MOSFET في البنية الداخلية. يختلف هذان النوعان من الدارات المتكاملة بقيم

- تيار الخرج الأعظمي maximum output current.
- جهد التغذية الأصغري وتيار التغذية الأصغري.
- تيار القدح الأصغري.
- سرعة الانتقال الأعظمية من حالة إلى أخرى.

تتفوق دارات CMOS على الدارات ثنائية القطبيَّة في كافة المواصفات ماعدا تيار الخرج الأعظمي. يمكن تمييز دارة 555 من نوع CMOS عند دارة 555 ثنائية القطبية من خلال وجود الحرف (C) في اسم الدارة (كمثال ICL7 555، TLC 555، LMC 555... الخ). تتوفر دارات 555 هجينة تجمع أفضل ميزات تقنيات CMOS والتقنية ثنائية القطبيَّة. يبيِّن الجدول (1.9) مواصفات بعض أنواع دارات 555.

الجدول (1.9): بعض مواصفات نماذج من دارات 555

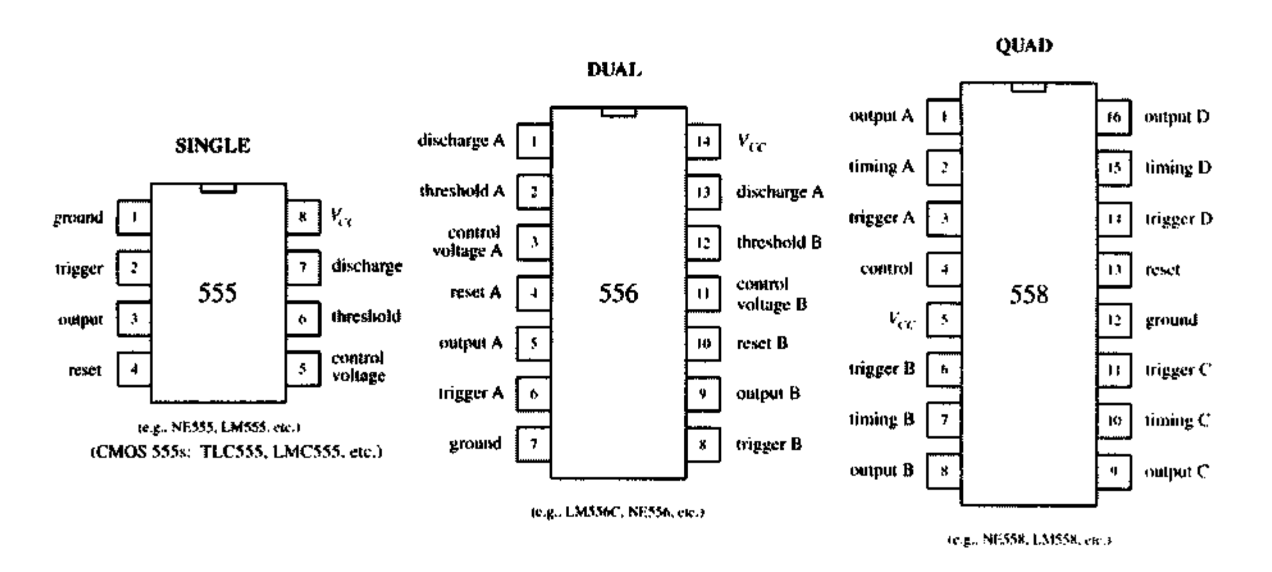
النوع	جهد التغذية		تيار التغذية $V_{cc} = 5$ V		تيار القدح تيار العتبة		التردد النموذجي (MHz)	$I_{out\ max}$ $V_{cc} = 5$ V	
	أصغري (V)	أعظمي (V)	نموذجي (µA)	أعظمي (µA)	نموجذي (nA)	أعظمي (nA)		مصدر (mA)	امتصاص (mA)
SN555	4.5	18	3000	5000	100	500	0.5	200	200
ICL7555	2	18	60	300	-	10	1	4	25
TLC555	2	18	170	-	0.01	-	2.1	10	100
LMC555	1.5	15	100	250	0.01	-	3	-	-
NE555	4.5	15	-	6000	-	-	-	-	200

إذا كنت تريد أكثر من دارة 555 في دارة متكاملة واحدة، فإن الدارة (556) تحوي بداخلها مؤقتين والدارة 558 تحوي بداخلها أربعة مؤقتات وتحوي الدارة (556) على مؤقتين منفصلين وظيفياً عن بعضهما ويشتركان فقط بنقطة التغذية. أما دارة 558 فتحوي بداخلها أربعة مؤقتات 555 مبسطة.

وفيها لا تظهر كافة أطراف الـــ 555 إلى الخرج، والدارة مصممة بشكل أساسي للعمل كمهتز وحيد الاستقرار مع أنها يمكن أن تعمل كمهتز عديم الاستقرار ولكنها تحتاج إلى بعض التغييرات. لمزيد من التفاصيل عن هذه الدارات ننصح بمراجعة نشرات المعطيات التي تقدمها الجهات الصانعة.

ملاحظة عملية

أوصل مكثف (0.1 µF) بين الرجل (5) للدارة 555 والأرض، وذلك لتجنب المشاكل المتعلقة بالقدح الخاطئ للدارة. في هذا الكتاب يُوصل المكثف 0.01 µF دوماً بين الرجل (5) والأرض. إذا كان سلك توصيل التغذية طويلاً وإذا لم تعمل دارة المؤقت لسبب مجهول أوصل مكثف 0.1 µF بين الرجل (8) والأرض.



الشكل (11.9): أشكال الدارات المتكاملة 555، 556 و558.

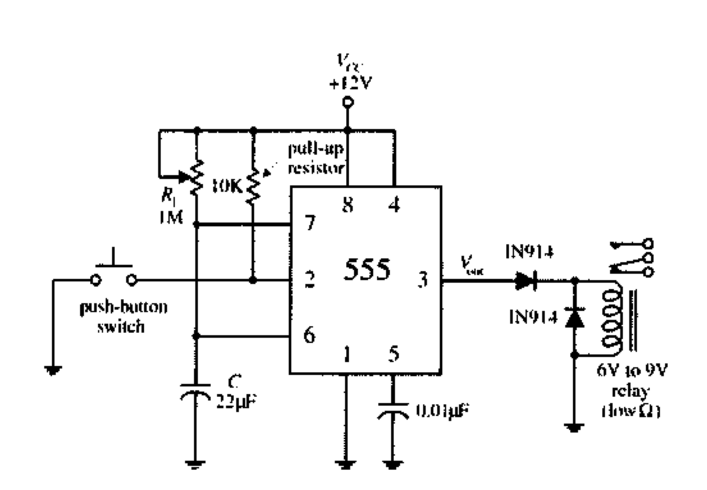
6.2.9 تطبيقات بسيطة للمؤقت 555

دارة قيادة حاكمة (مؤقت تأخير)

تعمل دارة وحيد الاستقرار المبينة في الشكل (12.9) كمؤقت تأخير وتستخدم لتفعيل حاكمة لفترة زمنية محددة. إذا كان مفتاح الضغط (push-button) في حالة فتح (open) يكون الخرج Low (أو 0.1 V) والحاكمة في حالة راحة. وعند إغلاق المفتاح لحظياً تبدأ دورة التوقيت لدارة 555 وينتقل الخرج إلى حالة high وجهد الخرج يساوي تقريباً (10.5 V) ويستمر الخرج (3) للدارة 555 على هذه الحالة لفترة زمنية تساوي:

$$t_{(delay)} = (1.1)\, R_1\, C$$

تُفعَّل الحاكمة خلال زمن يساوي [(1.1) R₁ C]. تستخدم الديودات لمنع حدوث ضرر لدارة 555 بسبب قفزات التيار عندما تتغير حالة الحاكمة.

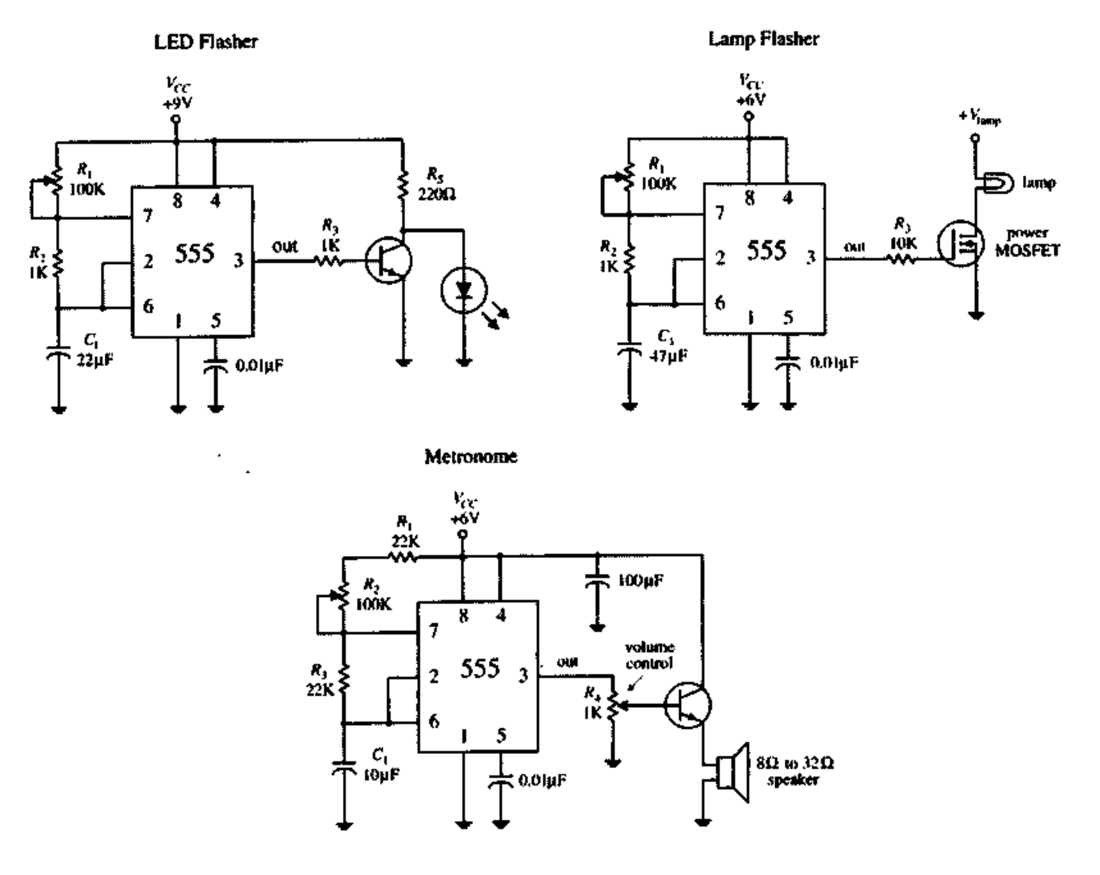


الشكل (12.9): دارة قيادة حاكمة.

دارات أضواء ومَاضة لمصباح وديود مصدر للضوء LED ودارة مولد موسيقي

كافة هذه الدارات هي دارات هزازات (مهتزات عديمة الاستقرار). في دارة الومَّاض التي تستخدم ديوداً مصدراً للضوء (LED) يستخدم ترانزستور لتكبير تيار خرج الدارة 555 من أجل قيادة الـ LED الضوئي وتستخدم المقاومة (R_S) لمنع حدوث ضرر في الـ LED بسبب التيار الزائد. في دارة الضوء الوماض التي تستخدم مصباحاً (Lamp) يستخدم ترانزستور

MOSFET للتحكم بالتيار المار عبر المصباح (Lamp). إذا كان تيار المصباح عالياً نحتاج إلى MOSFET استطاعي. تعطي دارة مولد الموسيقى سلسلة من الأصوات بمعدَّل يتعلق بالمقاومة (R_2). تستخدم المقاومة (R_4) لضبط شدة الصوت.



الشكل (13.9): دارات أضواء وموسيقى باستخدام المؤقت 555.

3.9 الهزازات المتحكم بها جهديا

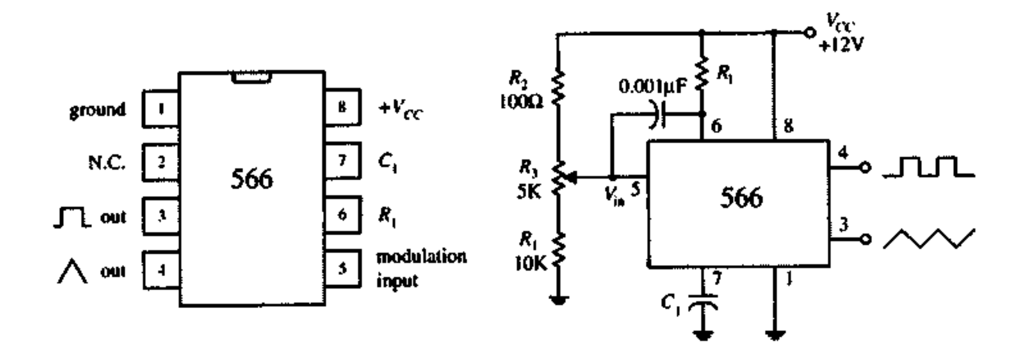
توجد في الأسواق أنواع من الهزازات تسمى الهزازات المتحكم بها جهدياً (VCOs)، وذلك طبعاً إضافة إلى دارات 555 المتكاملة. وبعض دارات الهزازات المتحكم بها جهدياً تعطي أكثر من خرج وبأشكال مختلفة. فالدارة NE566 التي تستخدم كمولد تشكيلة (Function Generator) هي دارة شديدة الاستقرار وسهلة الاستخدام وتعطي في خرجها موجات مربعة ومثلثيَّة. في دارة 556 المبينة في الشكل (14.9) تستخدم المقاومة (R_1) والمكثفة (C_1) للتحكم بالتردد المركزي أما جهد التحكم على الرجل (5) فإنه يغيِّر تردد الخرج ويطبق جهد التحكم على الدارة بواسطة مقسم جهد (R_2، R_3 وR_4). يمكن تحديد تردد خرج الدارة (566) باستخدام العلاقة:

$$f = \frac{2(V_{CC} - V_{in})}{R_1 C_1 V_{CC}}$$

$$V_{CC} \geq V_C \geq 0.75V_{CC}$$

$$2k \leq R_1 \leq 20k\Omega$$

V_C هو الجهد الذي يؤمنه مقسم الجهد R_2، R_3 و R_4 لمدخل التحكم.

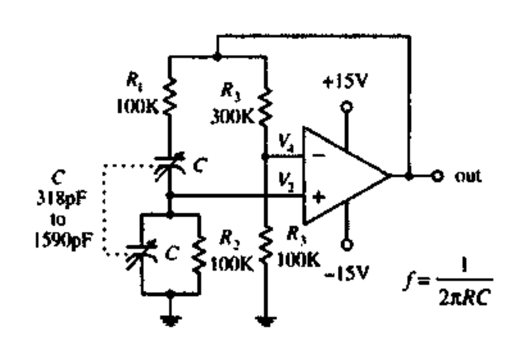


الشكل (14.9): شكل الدارة المتكاملة 566 ودارة مولد نبضات مربعة ومثلثية.

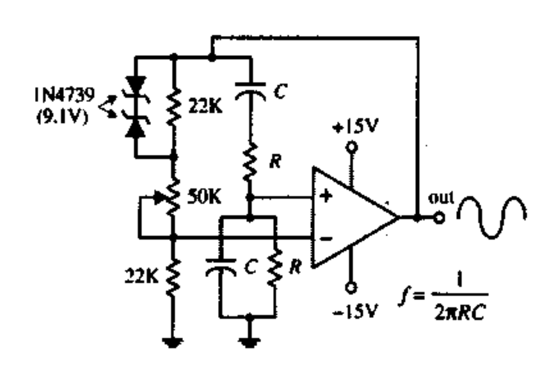
يمكن لأنواع أخرى من الهزازات المتحكم بها جهدياً مثل الدارة المتكاملة XR2206 أن تولد ثلاثة أنواع من إشارات الخرج مثل الموجة الجيبيَّة والموجة المربعة والموجة المثلثيّة. تصمم بعض الهزازات المتحكم بها جهدياً للعمل بشكل خاص في مجال توليد الإشارات الرقميّة ويمكن لهذه الدارات استخدام كريستال خارجي بدلاً من مكثف لتحسين استقرارية الاهتزاز. ولمعرفة أنواع الدارات المتكاملة التي تعمل كهزازات متحكم بها جدياً ابحث في الكتالوكات الإلكترونية.

4.9 هزاز جسر فين وهزاز دارة T المضاعفة

هزاز جسر فين (Wien) هو عبارة عن دارة هزاز نوع RC شائع الاستخدام لتوليد الاهتزازات الجيبيَّة في مجالات الترددات المنخفضة والمتوسطة، ويعتمد مبدأ توليد الاهتزاز في هزاز جسر فين على آلية جديدة (بعكس المبدأ المستخدم في دارات الهزازات النبضية التي دُرست حتى الآن)، حيث يتم توليد الاهتزاز هنا باستخدام دارة مرشح ناخب للتردد (frequency selective filter).



تعتبر دارة المرشح الناخب للتردد بمثابة القلب لهزاز جسر فين. توجد تغذية عكسية من خرج المضخم العملياتي إلى المدخل غير العاكس عبر شبكة RC، كما توجد تغذية عكسية سالبة عبر المقاومات إلى المدخل العاكس. عند تردد يساوي $f_0 = 1/(2\pi RC)$ يكون V_4 يساوي V_2 والتغذية العكسية السالبة تلغي التغذية العكسية الموجبة وينشأ الاهتزاز. عند أي تردد آخر يكون V_2 أصغر من V_4 ولا تهتز الدارة. يجب أن يُضبط الربح في هذه الدارة بحيث يكون مساوياً (3)، ويُضبط الربح بواسطة المقاومات (R_3) و(R_4) وإذا كان الربح أقل من (3) لا تهتز الدارة، أما إذا كان أكبر من (3) فإن خرج المضخم العملياتي يصل إلى الإشباع. إنَّ قيم العناصر المعطاة على الدارة تجعل الدارة تهتز في مجال من (1) إلى (5 kHz). يمكن ضبط التردد بواسطة المكثفات المتغيِّرة، ويوصل هذان المكثفان عادة إلى ذراعٍ واحد. الدارة الثانية المبينة في الشكل (15.9) تختلف قليلاً عن الدارة الأولى وفيها يجب أن تكون التغذية العكسية



الشكل (15.9): دارات هزاز جسر فين.

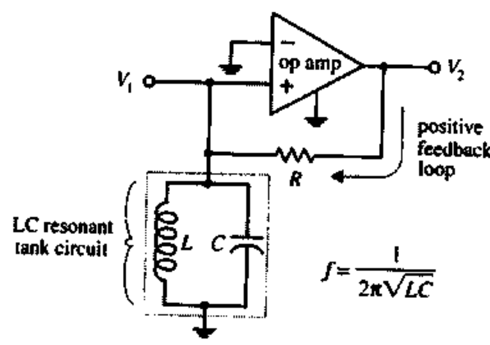
الموجبة أكبر من السالبة للحفاظ على الاهتزاز ويتحدد مقدار التغذية العكسية الموجبة بالفرع RC. بما أن التغذية العكسية الموجبة أكبر من التغذية العكسية السالبة فإن مشكلة الإشباع قد تواجهك، ولتلافي مشكلة الإشباع يُوصل ديودا زينر وجهاً لوجه أو ظهراً لظهر على طرفي المقاومة 22 kΩ، فعندما يزيد جهد الخرج إلى قيمة أعلى من جهد انهيار الزينر فإن أحد الزينرات يمرر اعتماداً على قطبية التغذية العكسيَّة والديود الذي يمرر يقصر المقاومة 22 kΩ فيقلل المقاومة في حلقة التغذية العكسية السالبة ويزداد مقدار التغذية العكسية المطبقة على الدارة وينخفض الربح ويقل التشويه.

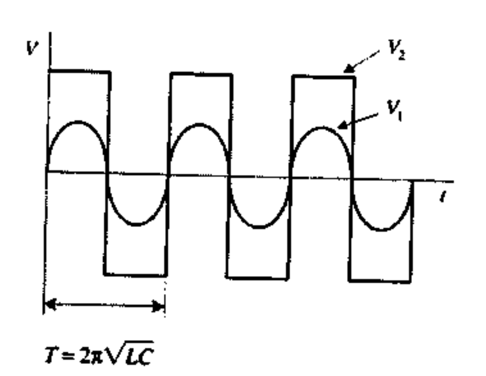
5.9 هزازات LC (هزازات جيبيّة)

عند الرغبة في توليد موجات جيبيَّة عالية التردد والتي تستخدم عادة في تطبيقات الاتصالات الراديوية، فإن الطريقة شائعة الاستخدام هي هزازات LC. لا يمكن استخدام دارات هزازات RC التي نوقشت سابقاً لتوليد الترددات الراديوية بسبب صعوبة التحكم بفرق الصفحة في حلقة التغذية العكسية كما أن قيم المكثفات والمقاومات اللازمة تصبح غير عمليّة، وبالمقابل يمكن لهزازات LC استخدام قيم صغيرة للتحريضيات والمكثفات لخلق هزازات بتغذية عكسيّة تستطيع توليد ترددات حتى 500 MHz. من المفيد أن نشير إلى أن هزازات LC تصبح غير مناسبة للاستخدام في مجال الترددات المنخفضة. تتكون هزازات LC من مضخم فيه تغذية عكسية موجبة عبر دارة LC ناخبة للتردد (أو دارة طنين). وتعمل دارة الطنين على إزالة الترددات المختلفة عن تردد الطنين من دخل المضخم. تعمل التغذية العكسية الموجبة والسلوك الطنيني على نشوء اهتزاز واستقراره في الدارة ككل، وإذا كانت هناك أية مشكلة في الفهم تذكر دارة الطنين التفرعية LC والتي إذا وصل فيها المكثف مشحوناً مع الملف فإنه ينشأ اهتزاز في الدارة بتردد يساوي تردد الطنين للدارة المكونة من (L) و(C) ولكن الاهتزاز يتخامد بسبب الضياعات في الدارة، وللحفاظ على الاهتزاز يستخدم مضخم في الدارة حيث يقوم المضخم بتزويد دارة الطنين بطاقة إضافية وتماماً في التوقيتات المناسبة للحفاظ على دوام الاهتزاز وفيما يلي مثال بسيط لتوضيح هذه النقطة.

تبيِّن دارة الشكل (16.9) مضخماً عملياتياً يحوي تغذية عكسية موجبة وجهد التغذية العكسية الموجبة المطبقة على الدخل يتكون على دارة الطنين L، C ولذلك فإن هذا الجهد سيكون له تردد مساوٍ لتردد الطنين أما جهود باقي الترددات فتكون تقريباً مهملة. تردد طنين دارة LC هو:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$





الشكل (16.9): دارة مضخم بتغذية عكسية موجبة وأشكال إشارات دخلها وخرجها.

تذكر من الفصل الثاني أن دارة الطنين التفرعيّة لها ممانعة وهذه الممانعة تصبح عالية عند تردد الطنين ولكنها تنخفض على جانبي الطنين مما يسمح بترشيح إشارات التغذية العكسية ـــ والتي تردداتها لا تساوي تردد الطنين ـــ إلى الأرض إذا طبق على V_1 جهد جيبي له تردد يساوي تردد الطنين فإن المضخم يقاد إلى الإشباع الموجب والسالب وتحصل في الخرج على موجة مربعة ولهذه الموجة مركبة جيبيّة (حسب فورير Fourier) لها تردد يساوي تردد الطنين، ولذلك يعود جزء من هذه المركبة عبر المقاومة R ويحافظ على الاهتزاز. إذا حذف الجهد الأولي (V_1) فإن الاهتزاز يدوم ويستمر. الآن لنفكر في الواقع العملي وليس النظري، ونلاحظ أنه ليس

ضرورياً وجود (V_1) الجهد الجيبي كي نحصل على الاهتزاز، وهذه نقطة هامة جداً، لأن عدم الخطيّة والحالة العابرة في دارة الهزاز تؤدي ذاتياً إلى نشوء الاهتزاز والسبب في ذلك هو وجود ضجيج في المضخم حتى لو كانت مداخله موصولة مع الأرض (انظر الفصل السابع) وهذا الضجيج له حسب فوريير مركبات ترددّية واحدة منها تساوي تردد الطنين وبسبب التغذية العكسيّة الموجبة فإن هذه المركبة تعود إلى الدخل وتضخم خلال عدة دورات حتى يصل مطالها إلى قيمة مناسبة.

إن هزازات LC العملية لا تحوي مضخمات عملياتية وذلك لأن المضخمات العملياتية لا تعمل جيداً على الترددات العالية بسبب معدل التباطؤ (slew rate)، كما أن عرض حزمة المضخمات العملياتية محدود، وعند الرغبة في الحصول على ترددات أعلى من 100 kHz من الضروري استخدام أنواع أُخرى من المضخمات. يستخدم المضخم الترانزستوري عند تشكيل هزازات عالية الترددات (ترانزستور ثنائي القطبيّة أو FET) وذلك لأن سرعة التبديل في الترانزستورات عالية جداً وغالباً ما تصل إلى 2000 MHz في الترانزستورات الراديوية. ولكن توجد مشكلة عند استخدام الترانزستورات في دارات الهزازات، وهذه المشكلة تتعلق بفرق الصفحة في الدارة فأغلب الترانزستورات تستخدم بتوصيلة عاكسة للصفحة ومن أجل الحصول على الاهتزاز تلزمنا تغذية عكسية موجبة ولذلك تستخدم دارات إزاحة صفحة بين خرج المضخم ودخله. وسنتعرف الآن على بعض الدارات الشائعة لهزازات LC.

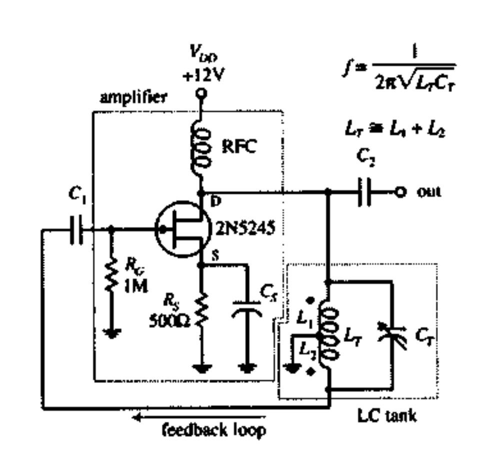
هزاز LC من نوع هارتلي

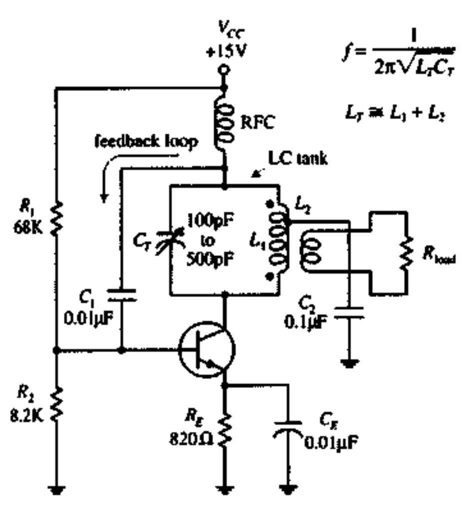
في هزاز هارتلي يستخدم ملف كمقسم للجهد من أجل تحديد نسبة التغذية العكسيّة، ويمكن أن يأخذ هزاز هارتلي أشكالاً مختلفة (FET، ترانزستور ثنائي القطبيّة، إلخ). يبيّن الشكل دارة هزاز هارتلي باستخدام ترانزستور FET وفي هذه الدارة يتم الحصول على إزاحة الصفحة (180°) اللازمة لضمان التغذية العكسية الموجبة بواسطة الملف ذي الفرعة الموجودة في الوسط والمؤرضة ولذلك يكون هناك فرق في الصفحة قدره 180° بين طرفي الملف. تربط التغذية العكسية عبر الملف إلى الدخل بواسطة المكثف (C_1). الملف المفرَّع يشبه محولاً ذاتياً طرفه الأولي هو (L_1) وطرفه الثانوي (L_2). يُعطى تردد الاهتزاز لهزاز هارتلي بالعلاقة

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_T C_T}}$$

ويمكن ضبط هذا التردد بواسطة المكثف C_T. المقاومة RG هي مقاومة استقطاب لبوابة الترانزستور وهي التي تؤمن جهد البوابة. المكثفات C_1 وC_2 هي مكثفات تمرر إشارة الاهتزاز المتناوبة وتحجب التيارات المستمرة. يساعد الخانق R.F.C (Radio Frequency Choke) على تأمين جهد التغذية المستمر المناسب للترانزستور ويمنع مرور إشارة التردد العالية عبر مصدر الجهد المستمر إلى الأرض.

الدارة الثانية في الشكل (17.9) هي نموذج آخر من هزاز هارتلي باستخدام ترانزستور ثنائي القطبيّة بدلاً من ترانزستور FET، وهنا أيضاً يتحدد تردد الاهتزاز بتردد طنين دارة LC. لاحظ ربط الحمل مع الدارة بواسطة محول.





الشكل (17.9): دارات هزاز هارتلي.

هزاز كولبتس (نوع LC)

يمكن استخدام هزاز كولبتس في مجالات ترددية مختلفة وهو أفضل استقرارا من هزاز هارتلي، وبعكس هزاز هارتلي يتم الحصول هنا على فرق الصفحة المطلوب بواسطة مكثفين موصولين على التسلسل والنقطة المشتركة بينهما مؤرضة والتيارالتسلسلي لدارة الطنين يولد على طرفي المكثفين جهدين متعاكسين بالصفحة. يُربط الجهد على طرف (C_4) مع قاعدة الترانزستور بواسطة (C_1). تطبق إشارة مجمع الترانزستور عبر (C_3) كإشارة تغذية عكسيّة وتطبق طاقة هذه الإشارة على دارة الطنين لتعويض الضياعات. يتحدد تردد الاهتزاز بتردد طنين دارة الطنين (LC).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{eff}}}$$

C_{eff} هي السعة المكافئة للمكثفات C_3 وC_4

$$\frac{1}{C_{eff}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

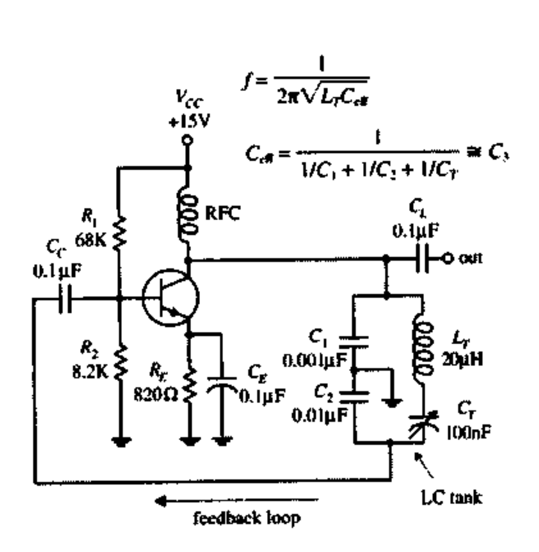
المكثفات (C_1) و(C_2) هي مكثفات حجز للتيارات المستمرة، أما المقاومات R_1 وR_2 فإنها تستخدم لضبط الاستقطاب للترانزستور. يستخدم الخانق R.F.C في دارات الترددات الراديوية لمنع مرور إشارة التردد العالي عبر مصدر جهد التغذية إلى الأرض وبالطبع يسمح الخانق بمرور التيار المستمر اللازم من مصدر التغذية إلى مجمع الترانزستور، يمكن استبدال دارة طنين الهزاز بإحدى دارتي الطنين الموجودتين أسفل دارة هزاز كولبتس، وفي إحدى الدارتين يوجد ملف قابل للضبط، أما في الدارة الأخرى فيوجد مكثف متغيِّر يوصل على التوازي مع الملف (L) من أجل تغيير تردد الطنين للدارة.

الشكل (18.9): دارة هزاز كولبتس.

هزاز كلاب

هزاز كلاب هو نوع خاص من هزاز كولبتس ويمتاز باستقرارية عالية جداً.

السعة المكافئة في دارة الطنين هي السعة المكافئة لـــ C_1 وC_2 الموصولين على التسلسل. أما التحريضية المكافئة لدارة الطنين فيتم تغييرها عن طريق إضافة مكثف C_T على التسلسل مع الملف (L_T)، وعادة تكون C_1 وC_2 أكبر من C_T بكثير. L_T وC_T يشكلان دارة طنين تسلسلية تهتز على التردد المرغوب وتحدد C_1 وC_2 نسبة التغذية العكسيّة وبما أن C_1 وC_2 أكبر من C_T فإن تغيير C_T لا يؤثر على نسبة التغذية العكسيَّة. تأتي استقرارية هزاز كلاب من أن السعات الداخلية للترانزستور لا تؤثر تقريباً على تردد الاهتزاز الذي يتحدد بالعناصر (L_T)، C_T وفق العلاقة:



الشكل (19.9): هزاز كلاب.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_T C_{eff}}}$$

$$C_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_T}} \approx C_3$$

6.9 الهزازات الكريستالية

لقد ارتأينا عزيزي القارئ وضع هذه الفقرة ضمن موقعنا على الإنترنت http://www.raypub.com. لذا، نتمنى منك العودة إلى الموقع لقراءة هذه الفكرة من صفحة الكتاب ضمن بند "أفكار وتقنيات".

10

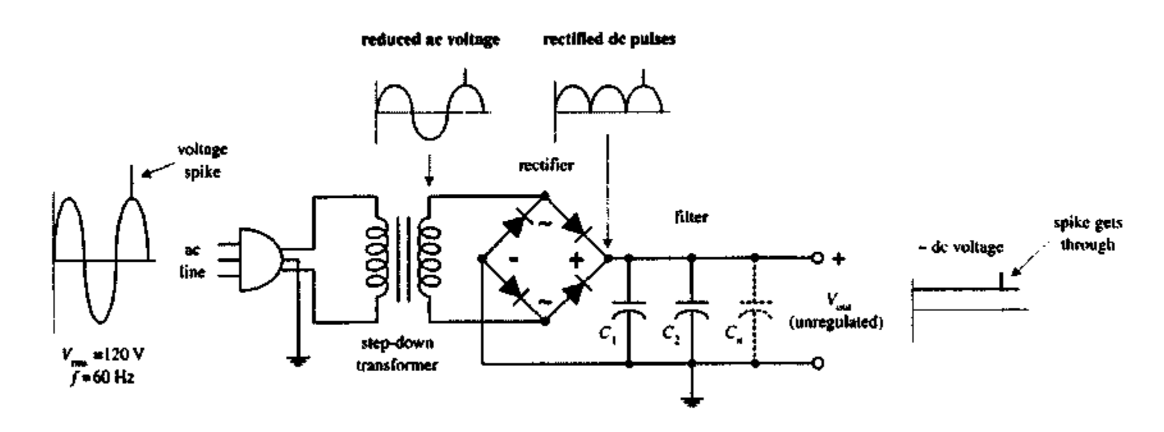


مصادر التغذية

تحتاج الدارات عادة إلى مصدر تغذية بالقدرة المستمرة (dc) يُعطي جهد خرج ثابتاً ويقدم تياراً كافياً لقيادة الحمل. تعتبر البطاريات مصادر جيدة للتغذية بالجهود المستمرة، ولكن سعاتها التيارية الصغيرة نسبياً تجعلها غير عمليّة لقيادة الدارات عالية التيارات والتي تستخدم (تُشغَّل) لفترات طويلة.

والحل الأفضل هو تحويل جهد شبكة المدينة المتناوب (120 V) و60 Hz (أو 220 V بتردد 50 Hz) إلى جهد مستمر (dc) قابل للاستخدام، وتتكون دارة تحويل الجهد المتناوب إلى جهد مستمر من:

محول (transformer) لتخفيض جهد شبكة المدينة المتناوب إلى قيمة مناسبة، ومقوِّم (rectifier) للتخلص من التأرجحات السالبة إذا كنت ترغب في الحصول على جهد موجب (أو للتخلص من التأرجحات الموجبة إذا كنت ترغب في الحصول على جهد سالب). وبعد التخلص من التأرجح غير المرغوب تستخدم دارة مرشح لتنعيم الإشارة المقوَّمة وتحويلها إلى جهد مسطح (مستمر تقريباً). يبيِّن الشكل (1.10) مكونات دارة محوِّل الجهد المتناوب إلى مستمر وأشكال الجهود في أماكن مختلفة من الدارة.

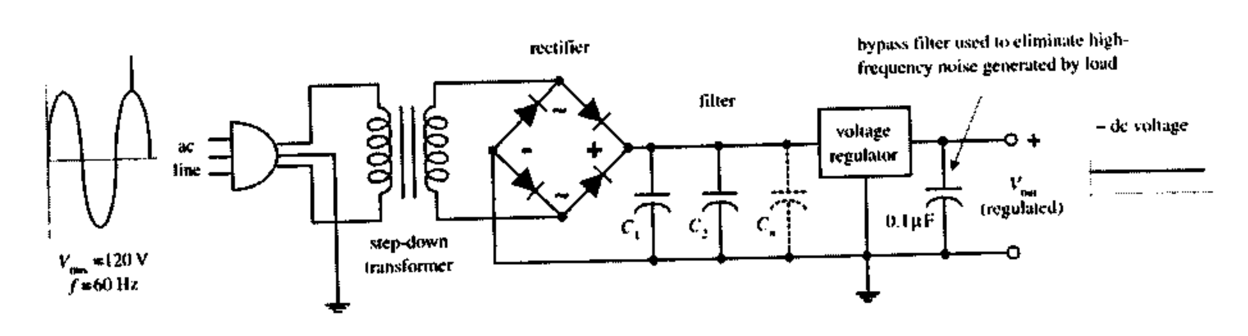


الشكل (1.10): دارة مبدّل جهد متناوب إلى مستمر.

بعد تحويل الجهد المتناوب إلى جهد مستمر تبقى فيه مشكلة وهي أن الجهد غير منظم (unregulated)، وهذا يعني أنه عند ظهور أية قفزة مفاجئة في جهد الدخل المتناوب، فإن جهد الخرج المستمر سوف يتغيَّر، لاحظ في الشكل (1.10) القفزة

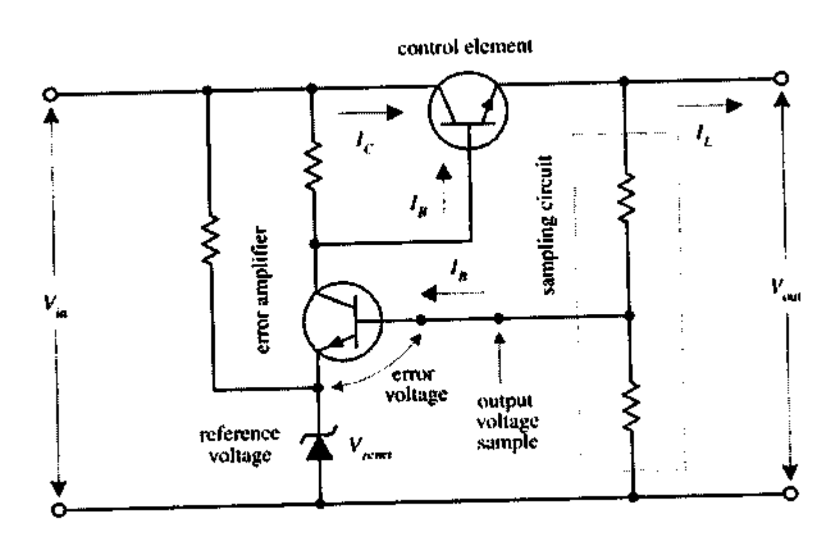
الجدية الموجودة في جهد الدخل وظهورها في جهد الخرج. إنّ استخدام مصدر جهد غير منظم لتغذية دارات حساسة (كالدارات المتكاملة الرقمية) أمر غير مرغوب، لأنّ ومضات (قفزات) التيار يمكن أن تقود إلى أمور غير مرغوبة (كالقدح الخاطئ مثلاً) ويمكن أن تؤدي إلى انهيار الدارة المتكاملة. توجد مشكلة أُخرى في مصدر التغذية غير المنظم وهي عدم ثبات جهد الخرج عند تغيُّر مقاومة الحمل، فإذا تم استبدال حمل عالي المقاومة (قليل استهلاك التيار) بحمل قليل المقاومة (شديد استهلاك التيار) فإن جهد الخرج لمصدر التغذية غير المنظم ينخفض (حسب قانون أوم).

ولحسن الحظ توجد دارات خاصة يمكن أن توضع في خرج مصدر التغذية غير المنظم لتحويله إلى مصدر تغذية منظم، وفي مصدر التغذية المنظم يتم الحفاظ على جهد خرج ثابت عند حدوث تغيرات في مقاومة الحمل أو تغيرات في مصدر الجهد المتناوب الذي يجري تقويمه، وتسمى دارة التغذية التي تحوي منظم جهد باسم مصدر تغذية منظم وتسمى دارة التنظيم منظم جهد (voltage regulator).



الشكل (2.10): دارة مصدر تغذية منظم.

يُصمَّم منظم الجهد بحيث يضبط آلياً مقدار التيار المتدفق عبر الحمل ـــ بحيث يتم الحفاظ على جهد خرج ثابت ـــ وذلك عن طريق مقارنة جهد خرج مصدر التغذية بجهد مرجعي داخلي ثابت. يتكون المنظم البسيط من دارة أخذ عينة (Sampling Circuit)، ومن مضخم خطأ (error amplifier) ومن عنصر تمرير (conduction element) ومن عنصر يستخدم كمرجع جهدي (انظر الشكل 3.10).



الشكل (3.10): دارة منظم جُهد.

تُراقب دارة أخذ العينة في المنظم (مقسِّم جهد) جهد الخرج عن طريق إعادة عينة من الجهد إلى مضخم خطأ. يعمل عنصر الجهد المرجعي (ديود زينر) على الحفاظ على جهد مرجعي ثابت ويستخدم هذا الجهد كجهد دخل آخر لمضخم الخطأ. يقارن مضخم الخطأ الفرق بين عينة جهد الخرج والجهد المرجعي ويولد جهد خطأ (error-voltage) إذا كان هناك فرق بين جهدي مدخليه. يُطبق جهد خرج مضخم الخطأ على عنصر التحكم بالتيار (current-control-element) والذي يكون عادة ترانزستوراً (transistor) ويستخدم هذا الترانزستور للتحكم بتيار الحمل.

لم يعد من الضروري هذه الأيام أن تقوم بتصميم منظم جهد بنفسك من مجموعة عناصر، وذلك بسبب توفر منظمات جهد متكاملة (ICs) في الأسواق.

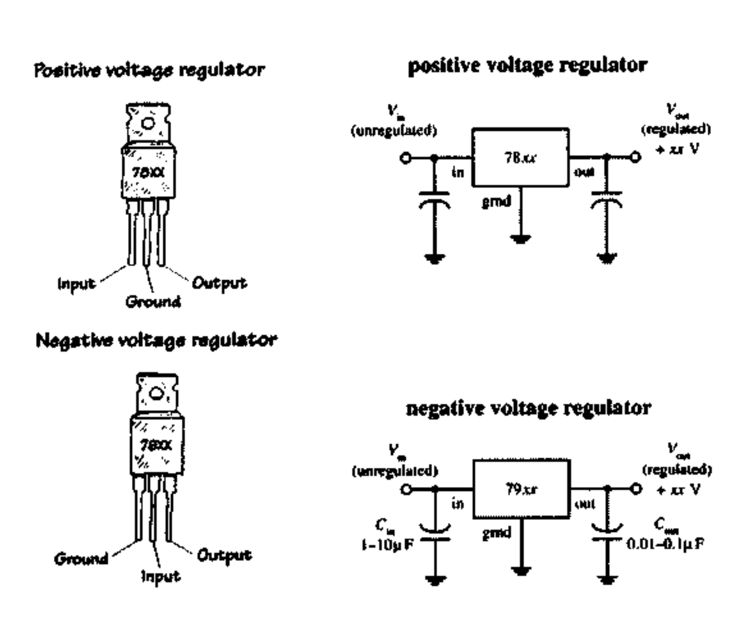
وسنتعرف الآن على منظمات الجهد المتكاملة.

1.10 دارات منظمات الجهد المتكاملة

توجد في الأسواق هذه الأيام أنواع عديدة من دارات منظمات الجهد المتكاملة (ICs). بعض هذه الدارات مصممة لتعطي جهد خرج ثابتاً موجباً، وبعضها الآخر مصمم ليعطي جهد خرج ثابتاً سالباً، والبعض يُعطي جهد خرج قابلاً للضبط ومثبّتاً.

1.1.10 دارات منظمات الجهد المتكاملة ذات الخرج الثابت

تعتبر السلسلة (LM78XX) من أبرز منظمات الجهد ذات الثلاث أرجل والخانات "XX" تمثل قيمة جهد الخرج الثابت الذي يؤمنه المنظم فمثلاً 7805 يُعطي جهد خرج (5 V) ثابتاً و7806 يُعطي جهد خرج (6 V) ثابتاً و7810 يعطي (10 V) و7812 يعطي (12 V)، 7815 يعطي (15 V)، و7818 يُعطي (18) و7824 يعطي (24). كل هذه المنظمات قادرة على تأمين تيار (1.5 A) للحمل عند تبديد الحرارة بشكلٍ مناسب عنها. توصل مكثفات بين دخل المنظم والأرض وبين خرج المنظم والأرض لإزالة القفزات الضجيجيَّة، كما في الشكل (4.10). تعطي سلسلة المنظمات (LM79XX) في خرجها جهوداً سالبة ثابتة وتؤمن منظماتها تيار حمل يساوي (1.5 A).



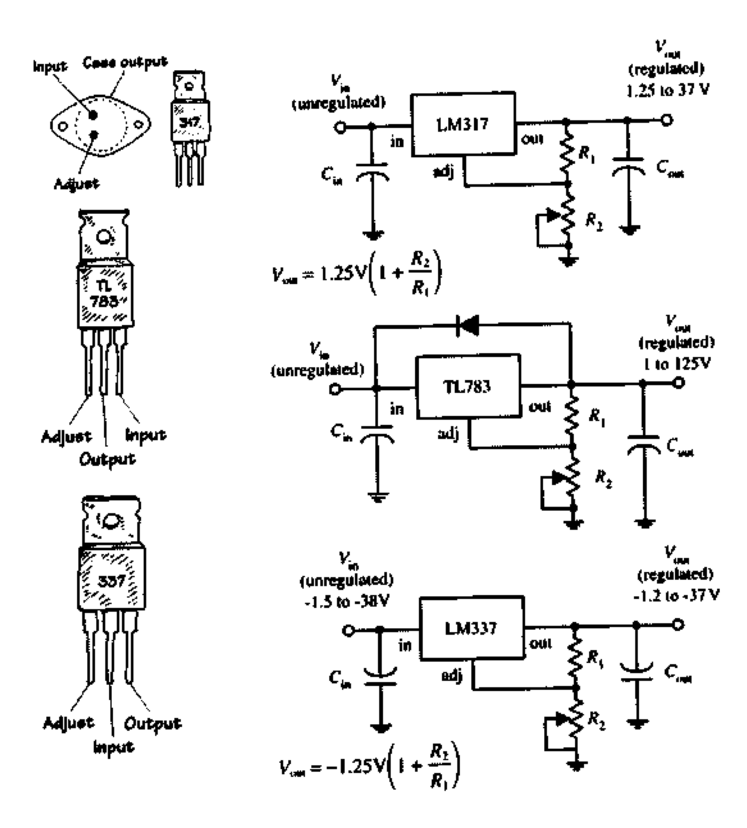
الشكل (4.10): أشكال المنظمات وطرق توصيلها في الدارات.

ويوجد العديد من الجهات الصانعة التي تنتج هذه المنظمات ويمتاز بعضها عن الأخرى بمقدرتها على تأمين تيارات أعلى للأحمال. انظر إلى كتالوكات العناصر الإلكترونية للإطلاع على النماذج المتوفرة.

2.1.10 دارات منظمات الجهد المتكاملة القابلة للضبط

يُعطي المنظم LM317 المبيَّن في الشكل (5.10) جهد خرج موجباً قابلاً للضبط، وهذا المنظم له ثلاث أرجل ويمكن تشغيل المنظم بعد وصل مقاومتين خارجيتين معه مع أجل ضبط جهد الخرج المطلوب. يولد المنظم LM317 أثناء عمله جهداً مرجعياً يساوي (1.25 V) بين الخرج ورجل الضبط وهذا الجهد يهبط على المقاومة (R_1) وبما أن هذا الجهد ثابت دوماً فإن تياراً ثابتاً (I_1) يمر عبر المقاومة (R_2) ويؤدي إلى تكوُّن جهد خرج يعطى بالمعادلة التالية:

$$V_{out} = 12.5\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)$$



الشكل (5.10): أشكال منظمات الجهد القابلة للضبط وطرق توصيلها

يزداد جهد الخرج بزيادة (R_2). يصمم الـ LM317 ليقبل جهد خرج غير منظم حتى (37 V) ويمكن أن يُعطي تيار خرج حتى (1.5 A). المنظم LT783 هو نوع آخر من منظمات الجهد الموجب القابل للضبط ويمكن لهذا المنظم أن يُعطي جهود خرج من (1) وحتى (125 V) بتيار خرج أعظمي حتى (700 mA). المنظم LM337T هو منظم جهد سالب، ويُعطي جهد خرج قابلاً للضبط بين (-1.2 V) و(-37 V) بتيار خرج حتى (1.5 A).

إذا أردت أن تعرف الأنواع الأخرى من المنظمات المتوفرة في الأسواق ارجع إلى كتالوك العناصر الإلكترونية. توضع المكثفة (C_{in}) في الدارة إذا كان المنظم بعيداً عن مصدر التغذية وقيمتها حوالي 0.1 µF.

أما (C_{out}) فتستخدم لإزالة قفزات الجهد في الخرج وهي حوالي 0.1 µF أو أكبر.

3.1.10 مواصفات المنظم

تُعطى المواصفات التالية للمنظمات في جدول مواصفات المنظمات:

- جهد الخرج (output voltage).
- الدقة (كنسبة مئوية).
- تيار الخرج الأعظمي.
- تبديد الاستطاعة.
- جهود الدخل الأعظمية والأصغرية.
- رفض التموُّج 120 Hz (مقدراً بالديسيبل).

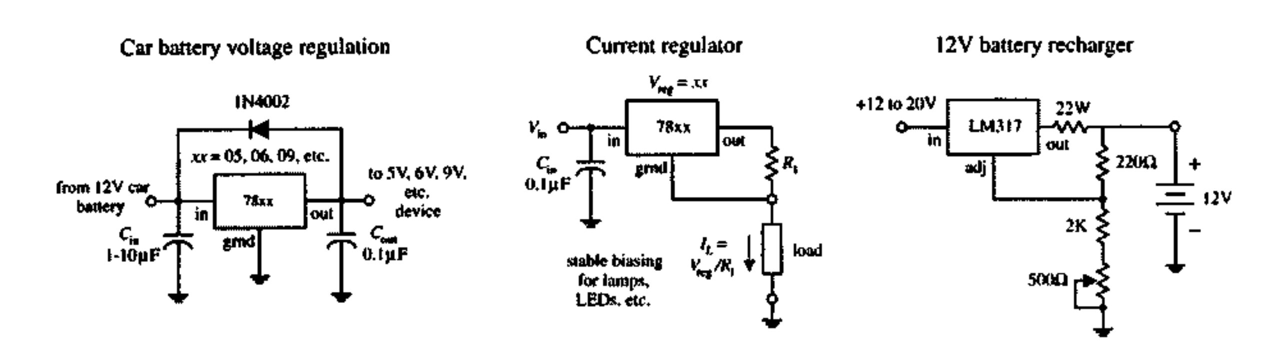
- ❑ الاستقرار الحراري ($\Delta V_{out}/\Delta T$).
- ❑ ممانعة الخرج (عند تردد محدَّد).

إنَّ ميزة رفض التموُّج يمكن أن تخفض تغيرات الجهد بشكل كبير في خرج مصدر التغذية، كما سنوضح لاحقاً في هذا الفصل.

2.10 نظرة سريعة على بعض التطبيقات القليلة للمنظم

قبل إلقاء نظرة على كيفية استخدام منظمات الجهد في مصادر التغذية، من المفيد أن نرى كيف تستخدم المنظمات في أنواع أخرى من التطبيقات.

ويبيِّن الشكل (6.10) بعض الأمثلة. تبيِّن الدارة اليسارية الأولى استخدام المنظم 78XX كمنظم لجهد يوصل مع بطارية السيارة للحصول على جهود (5 V)، أو 6 V، أو 9 V وغيرها، أما الدارة في الوسط فهي عبارة عن منظم تيار أما الدارة الأخيرة فيمكن استخدامها مع جهاز شاحن بطاريات.



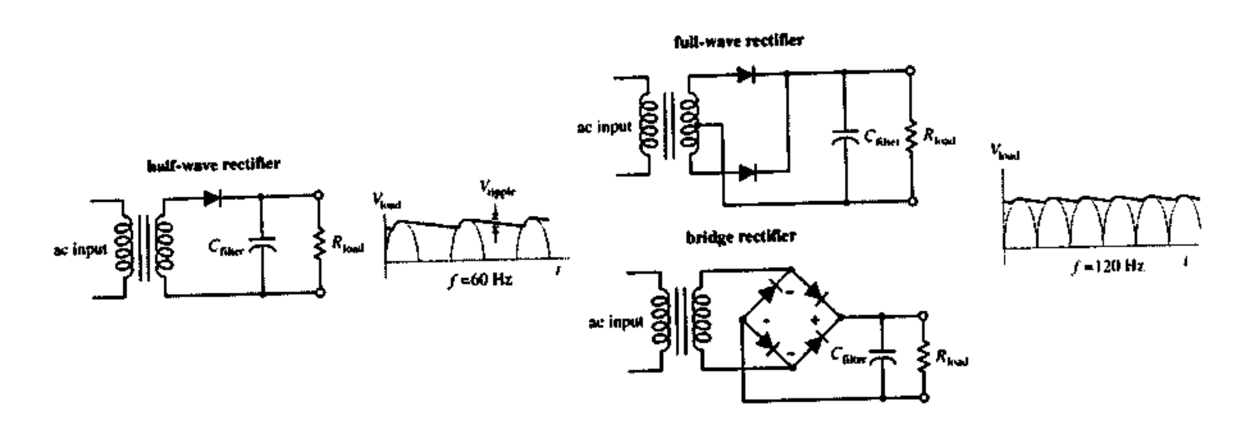
الشكل (6.10): تطبيقات بسيطة للمنظمات.

3.10 المحول

من الضروري اختيار المحول المناسب لمصدر التغذية، فجهد خرج المحول لا يجب أن يكون أكبر بكثير من جهد الخرج المنظم، وإذا لم يُراعَ ذلك فإن الطاقة سوف تضيع لأن المنظم يجبَر على تبديد الحرارة. وبنفس الوقت يجب أن لا يقل جهد خرج المحوِّل عن جهد الدخل الأصغري للمنظم (وبشكل نموذجي يجب أن يكون جهد خرج المحول أكبر بـ (2) إلى (3) فولت من جهد الخرج.

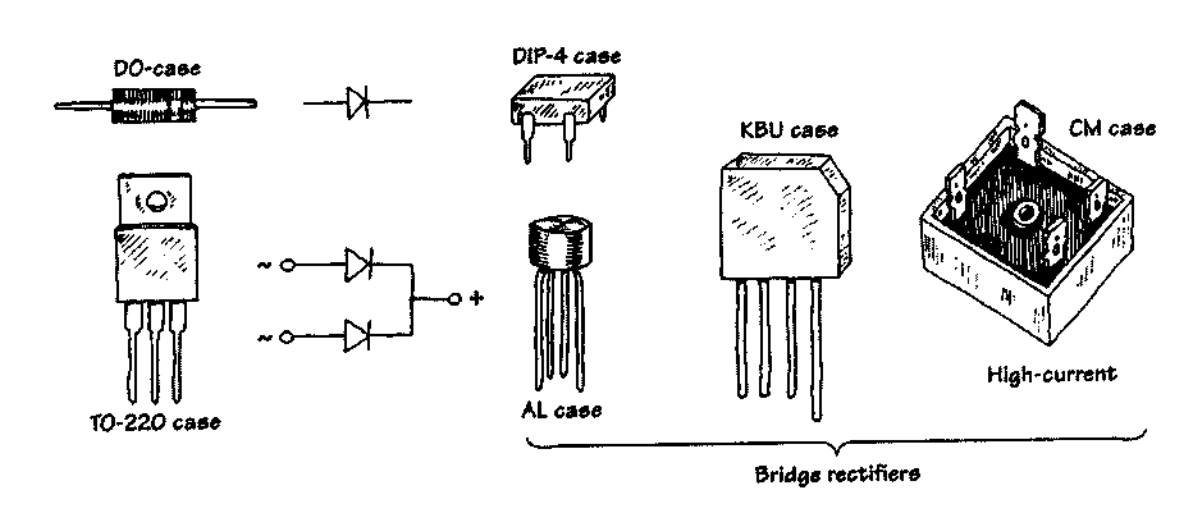
4.10 أغلفة المقومات (مقوِّمات مغلفة جاهزة)

إنَّ الأنواع الأساسيّة للمقومات المستخدمة في مصادر التغذية هي مقوِّم نصف الموجة (half-wave rectifier) ومقوِّم الموجة الكاملة (full-wave rectifier) والمقوِّم الجسري (bridge rectifier) المبينة في الشكل (7.10) ولفهم آلية عمل هذه المقاومات راجع الفصل الرابع.



الشكل (7.10): الأنواع الأساسية لدارات المقومات.

يمكن تشكيل مقومات نصف الموجة، والموجة الكاملة والمقوم الجسري بالكامل بواسطة ديودات، ولكن تتوفر مقومات الموجة الكاملة والمقومات الجسرية جاهزة ضمن أغلفة (انظر الشكل 8.10).



الشكل (8.10) نماذج أغلفة مقومات الموجة الكاملة الجاهزة

عند استخدام الديودات في التقويم يجب التأكد من أن الديودات تتحمل التيارات والجهود الأعظمية العكسيَّة التي تهبط عليها أثناء العمل (أي يجب التأكد من معدلات التيار والجهد العكسي الأعظمي (PIV) للديود.

تتراوح معدلات التيار لديودات التقويم بين (1 A) و(25 A) أما معدَّل (PIV) فتتراوح بين (50) و(1000 V). أما معدلات قفزات التيار المفاجئة فتراوح بين (30) و(400 A). تعتبر الديودات IN4001 و1N4007 (معدلات تيارها 1 A وهبوط الجهد عليها أثناء العمل 0.9 V) والديودات IN5059 وحتى 1N5062 (معدل التيار 2 A وهبوط الجهد عليها 1 V)، والديودات 1N5624 وحتى 1N5627 (معدلات تيارائها 5 A وهبوط الجهد الأمامي عليها 1 V) وكذلك الديودات 1N1183 A - 90 A (معدل التيار 40 A وهبوط الجهد الأمامي 0.9 V) من الديودات شائعة الاستخدام في المقومات متعددة الاستخدامات.

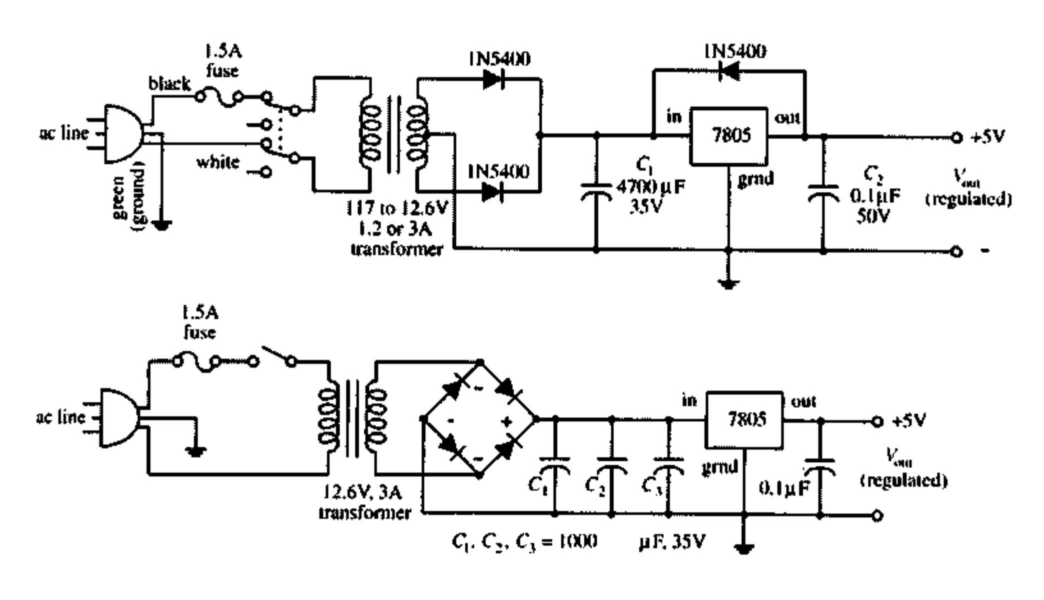
في تطبيقات تقويم الجهود المنخفضة تستخدم ديودات شوتكي (Schottky barrier diodes)، وهبوط الجهد الأمامي على ديود شوتكي أقل من هبوط الجهد الأمامي على الديود النموذجي (وفي الحالة العامة يقل عنه بـــ 0.4 V) ولكن جهود انهيار ديودات شوتكي أقل بكثير من الديودات العادية.

تتوفر جسور تقويم جاهزة كمقومات موجة كاملة من سلسلة 3N246 وحتى 3N252 (بمعدَّل تيار 1 A وهبوط جهد أمامي 0.9 V) ومن سلسلة 3N253 إلى 3N259 (بمعدَّل تيار 2 A وهبوط جهد أمامي 0.85 V).

5.10 بعض مصادر التغذية البسيطة

مصادر التغذية المنظمة (+5 V)

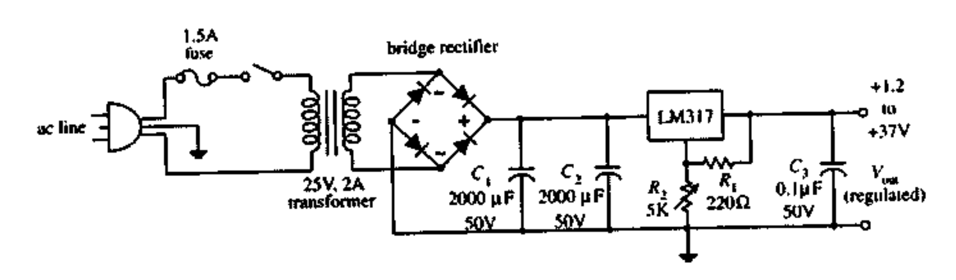
في الدارة العلوية من الشكل (9.10) يستخدم محول بنقطة وسطى في طرف الثانوي. جهد ثانوي المحول يساوي 12.6 V ويتراوح تيار الثانوي بين (1.2) و(3 A). يُقوِّم الجهد بواسطة الديودات وينعم بواسطة مكثف الترشيح (C_1) ويعطي المنظم 7805 في خرجه جهداً منظماً يساوي (+5 V). توصل (C_2) بين خرج المنظم والأرض لتمرر الضجيج عالي التردد إلى الأرض، وهذا الضجيج يمكن أن يتولد عن الحمل. يوضع ديود بين خرج المنظم (7805) ودخله كما في الشكل لحماية المنظم من التيارات العكسية التي يمكن أن تؤدي إلى تخريبه. وهذه القفزات يمكن أن تنشأ عند توقيف مصدر التغذية عن العمل، فمثلاً يمكن أن يفرِّغ مكثف الخرج بشكل أقل سرعة من تفريغ مكثف الدخل، وهذا يؤدي إلى استقطاب عكسي على المنظم ويمكن أن يؤدي إلى تدميره، ويعمل الديود على تمرير التيار غير المرغوب بعيداً عن المنظم. مصدر التغذية الثاني في الدارة يشبه الأول ولكن المقوم المستخدم فيه هو مقوِّم جسري.



الشكل (9.10): دارات مصادر تغذية (+5 V).

مصدر تغذية قابل للضبط +1.2 V إلى 37 V بتيار (1.5 A)

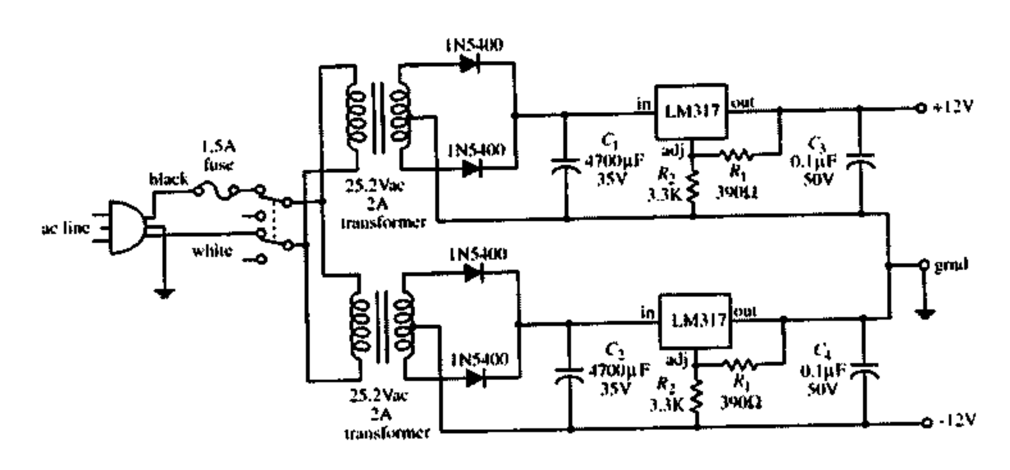
يبيِّن الشكل مصدر تغذية متغيِّراً بين (+1.2 V) و(+37 V) يستخدم منظم جهد LM317T قابل للضبط لتنظيم جهد الخرج. يُضبط جهد الخرج بتغيير المقاومة (R_2). تعمل (C_2) كمكثفة ترشيح والمكثف (3) كمكثف تمرير جانبي للترددات العالية (انظر المثال الأخير).



الشكل (10.10): مصدر تغذية بخرج متغير في مجال.

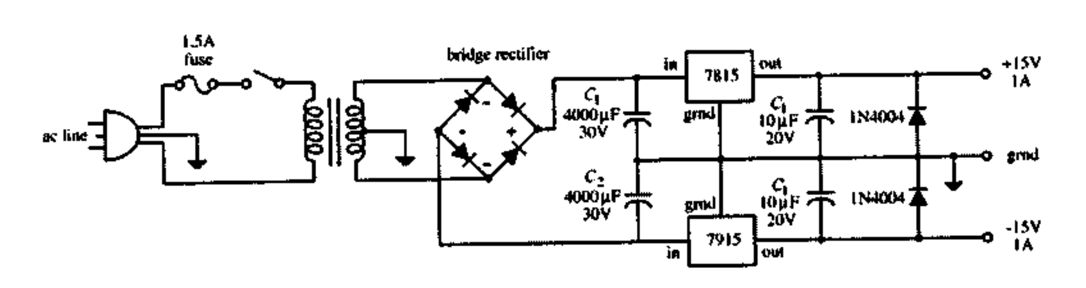
مصادر تغذية V 12± و V 15±

يستخدم في الدارة العلوية من الشكل (11.10) منظما جهد قابلان للضبط LM317 ومحولان (V 25.2) كل منهما له ثانوي ذي نقطة وسطى من أجل تكوين مصدر تغذية V 12 ± ثنائي القطبيّة بتيار خرج أعظمي (A 1.5). مع أن المنظم LM317 غير مصمم لتنظيم الجهود السالبة، إلا أنه موصول في الدارة بحيث تطبق عليه القطبيات الصحيحة (المحولات موصولة بطريقة تجعل القطبيات المطبقة على المنظمات صحيحة). تستخدم المقاومات (R_1) و(R_4) لضبط جهد الخرج.



تابع الشكل (10.10): مصدر تغذية بخرج متغير في مجال.

في الدارة السفلية يستخدم منظم جهد موجب (7815) ومنظم جهد سالب (7915) لتشكيل مصدر تغذية V 15 ±، ولاحظ في هذه الدارة أن محولاً واحداً يكفي لتشكيل مصدر التغذية المطلوب أما في الدارة السابقة فقد تم استخدام محولين.



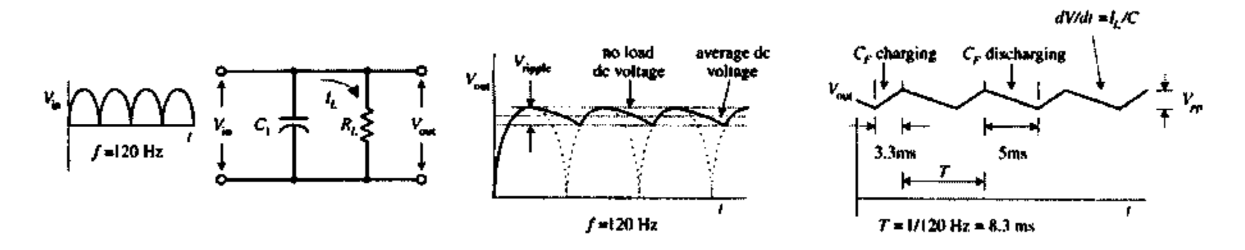
الشكل (11.10): مصادر تغذية (V 12 ±) و(V 15 ±).

6.10 تخفيض التموج

عند استخدام مصدر تغذية في دارة حساسة يجب أن تكون تغيرات جهد خرجه صغيرة قدر الإمكان، فمثلاً عند تغذية دارات متكاملة رقمية بجهد تغذية (V 5 +) يجب أن لا تزيد تغيرات جهد الخرج عن (% 5) أي عن (V 0.25)، إن لم تكن التغيرات أصغر من ذلك.

إن الدارات التكاملية الرقمية المنطقية لها في الحقيقة هامش ضجيج أصغري 200 mV حول المستويات المنطقية الحدّيّة. كذلك الأمر في الدارات التشابهية حيث تؤدي تغيرات جهود التغذية إلى تغيرات في إشارات خرج الدارات مما يؤدي إلى مشاكل في عملها. والسؤال الذي يتبادر إلى الذهن هو كيف نحافظ على التغيرات في جهد خرج مصدر التغذية بحدها الأدنى؟ والجواب على ذلك بسيط وهو باستخدام مكثفات الترشيح والمنظمات.

تعمل مكثفات الترشيح على تخفيض الخفقان في جهد الخرج بتخزين الشحنة خلال فترة تزايد الجهد في خرج المقوم وتفريغ الشحنة عبر الحمل وفق معدَّل بطيء بقدر كاف للحفاظ على مستوى جهد الخرج خلال فترة تناقص الجهد في خرج المقوِّم. إذا كانت سعة المكثف صغيرة، فإنها لا تختزِن شحنة كافية للحفاظ على تيار الحمل وجهد الخرج خلال فترة انخفاض جهد خرج المقوِّم.



الشكل (12.10): تأثير المكثف على شكل جهد خرج المقوِّم.

يؤثر التيار الذي يستهلكه الحمل على معدَّل تفريغ المكثف، فإذا كانت مقاومة الحمل منخفضة سيكون تيار الحمل عالياً ويفرِّغ المكثف بسرعة ويؤدي ذلك إلى انخفاض الجهد على المكثف وبالتالي انخفاض جهد الخرج بسرعة، أما إذا كانت مقاومة الحمل عالية وتياره منخفضاً فإن انخفاض جهد المكثف وبالتالي جهد الخرج سيكون قليلاً ويمكن إهماله. يمكن حساب انخفاض الجهد على المكثف خلال التفريغ باستخدام العلاقة:

$$I = C\frac{dv}{dt} = C.\frac{\Delta V}{\Delta t}$$

I: تيار الحمل.

Δt: زمن التفريغ.

ΔV: تغيرات الجهد حول القيمة الوسطى للجهد المستمر.

يُسمى المقدار (ΔV) باسم تموُّج أو تعرُّج الجهد من القمة إلى القمة (peak-to-peak-ripple voltage)، ويرمز له بالرمز $V_{ripple(PP)}$ ويمكن للسهولة استبدال الانخفاض الأسي للجهد على المكثف بانخفاض خطي (انظر الشكل اليميني (12.10)، ويمكن حساب (Δt) تقريبياً من العلاقة:

$$\Delta t = 1/f$$

f: تردد جهد الخرج المقوَّم فمثلاً إذا كان تردد جهد شبكة المدينة 60 Hz وكان المقوِّم المستخدم مقوم موجة كاملة يكون (f) في خرج المقوِّم 120 Hz وبالتالي:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{120Hz} = 8.3\times10^{-3}S$$

يكون زمن تفريغ المكثف في الواقع مساوياً (5 mS) أما الـ (3.3 mS) المتبقية من الدورة فهي فترة شحن للمكثف. يمكن تبسيط الحسابات باستخدام العلاقة التالية:

$$V_{ripple(rms)} = (0.0024)\frac{I_L}{C_f}$$

لاحظ أن جهد التعرجات في المعادلة الأخيرة معطى كقيمة فعالة، ويمكن حساب تأرجح جهد الخرج من القمة إلى القمة من العلاقة:

$$V_{PP} = \sqrt{2}V_{rms}$$

سنوجد الآن جهد التموُّج لمصدر تغذية يُعطي جهد خرج مستمراً (5 V) ويستخدم مكثفاً $C_f = 4700\ \mu F$ وتيار حمله الأعظمي (1 A). سنفترض أن الدارة لا تحوي منظم جهد:

$$V_{ripple(rms)} = (0.0024)\frac{1A}{4700\mu F} = 510mV$$

ذكرنا سابقاً أن مقدار التغيرات في جهد الخرج عند تغذية دارات رقمية يجب أن لا تزيد عن % 5 أي يجب أن لا تزيد عن:

$$(5\times0.05) = \pm0.25\ V$$

أي (250 mV ±) وبالتالي نلاحظ أن الـ (510 mV) كبيرة جداً وغير مسموحة. إذن عليك إيجاد قيمة المكثفة المناسبة التي تجعل تغيرات جهد الخرج ضمن المجال المسموح وقد تتصور أن الوضع يتحسن إذا كانت قيمة (C) عالية جداً، لا نهاية مثلاً، وهذا نظرياً فقط ممكن، ولكنه لا يتحقق عملياً لأنه لا توجد مكثفة ذات سعة لا نهائية، ومن ناحية ثانية إذا توفرت مكثفة ذات سعة كبيرة فإن التسامح في قيمة المكثفة يخلق مشكلة إذ أن تسامحات المكثفات المستخدمة للترشيح في دارات التقويم تتراوح بين (% 5) إلى (% 20) لذلك لا يمكن تحسين عامل التموُّج فقط باستخدام المكثفات وعليك البحث عن وسيلة أخرى والوسيلة الأخرى هذه هي منظم الجهد (voltage regulator). يُعطى بارامتر لمنظم الجهد يسمى رفض التموُّج (التعرُّج) — ripple rejection — ويُعطى هذا البارامتر بالـ dB فمثلاً للمنظم 7805 بارامتر رفض تموُّج يساوي 60 dB وباستخدام علاقة التخميد يمكن إيجاد مقدار تخفيض التموُّج:

$$-60dB = 20Log_{10}\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)$$

$$-3 = Log_{10}\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)$$

$$10^{-3} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

وهذه العلاقة الأخيرة تبيِّن أن تموُّج جهد الخرج يُخفض بمعدل (1000) مرة، وهذا يعني أن استخدام هذا المنظم مع دارة المقوِّم السابق سيؤدي إلى انخفاض تموُّجات جهد الخرج في خرج المنظم إلى (0.51 mV) فقط، وهذه القيمة ضمن المجال المسموح. من الضروري التذكير بأن المنظم (7805) وكي يعمل بشكل جيد يتطلب أن يكون جهد دخله أكبر من جهد خرجه على الأقل بـــ (3 V) ولكي تحصل من المنظم على جهد خرج يساوي (5 V) يجب أن يكون جهد دخله على الأقل (8 V)، وهبوط الجهد على المنظم ذاته يتراوح بين (1) و(2 V) ولذلك يجب أن يكون جهد ثانوي المحول أكبر من (8 V)، ولذلك من المفيد استخدام محول بجهد خرج (12 V) إذا كنت تريد الحصول على مصدر تغذية مستمر بجهد خرج (5 V +). سنناقش الآن رفض المنظم القابل للضبط LM317 للتموُّج. ولنفرض أن منظماً من نوع LM317 مستخدماً في دارة مصدر تغذية يُعطي ثانوي المحول فيها جهداً يساوي (12.6 V). إن القيمة العظمى لجهد المكثف خلال دورة ستكون

(17.8 V) وهو مقدار الجهد من القمة إلى القمة على ثانوي المحول. تبلغ قيمة رفض التموُّج في المنظم LM317 حوالي 65 dB ويمكن زيادة هذه القيمة إلى (80 dB) باستخدام مكثف تمرير جانبي (10 µF) في دارة المنظم (كما في الشكل 13.10).

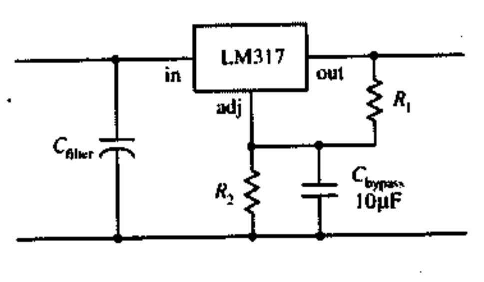
بفرض أن C = 4700 µF، وأن تيار الحمل الأعظمي يساوي (1.5 A)، فإن مقدار جهد التموُّج سيكون:

$$V_{ripple(rms)} = 0.0024\ (1.5\ A/4700\ \mu F) = 760\ mV$$

وهذا المقدار من التموُّج أكبر بكثير مما هو مسموح عند التعامل مع الدارات المتكاملة الحساسة، ولكن باستخدام المنظم LM317 مع مكثف تمرير جانبي (bypass-capacitor) نجد أن:

$$-80dB = 20Log_{10}\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)$$

$$-4 = Log_{10}\frac{V_{out}}{V_{in}} \Rightarrow 10^{-4} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

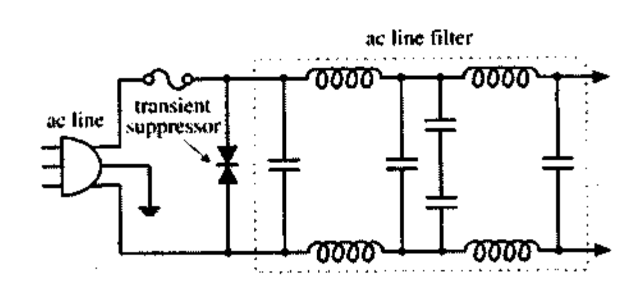


الشكل (13.10) دارة منظم LM317.

وهذا يعني أن التموج في خرج المنظم ينخفض بمقدار (10000) مرة، أي ينخفض إلى (0.076 mV) فقط.

7.10 مرشحات الخط وكوابت الحالات العابرة

إن مرشح الخط هو عبارة عن مرشح LC يوصل مع مصدر التغذية لترشيح التشويشات عالية التردد غير المرغوبة التي تكون موجودة على خطوط القدرة الكهربائية. يمكن أن تخفض مرشحات الخط أيضاً القفزات الجهدية، كما أنها تساعد على التخفيف من الإشعاع التشويشي عالي التردد عبر خطوط القدرة والذي ينتج عن عمل مصدر التغذية. يوضع مرشح الخط قبل محول مصدر التغذية كما في الشكل (14.10) تباع مرشحات الخط جاهزة ضمن غلاف (علبة) وللإطلاع على المزيد من التفاصيل ننصح بمراجعة الكتالوكات الإلكترونية. أما كابت الحالة العابرة فهو عبارة عن أداة (device) تُقصر عند زيادة جهد طرفية معينة عن الحدود الآمنة (عند حدوث ومضات جهدية أو تيارية مثلاً). ويعمل هذا العنصر (أو الأداة) مثل ديود زينر استطاعي ثنائي الاتجاه، وهذه العناصر رخيصة الثمن وتتوفر بأغلفة مشابهة لأغلفة الديودات وتتوفر بمعدلات جهود منخفضة وبجهود نبضية ذات قيم عظمى.



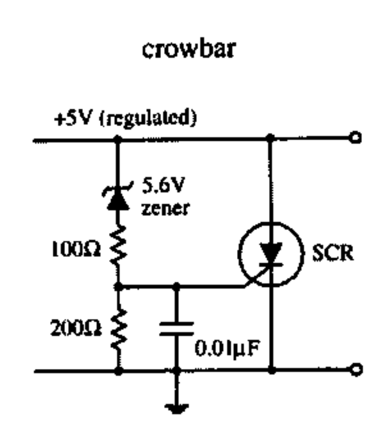
الشكل (14.10): دارة مرشح خط وكابت حالة عابرة.

الحماية من الجهد الزائد

إن دارة الحماية من الجهد الزائد ودارات القص المبينة في الشكل (15.10) يمكن أن توصل بين خرج المنظم والحمل لحماية الحمل من الجهد غير المنظم الذي يُطبق على الحمل عند تعطل المنظم (لسبب دخلي في دارته).

دارة حماية من الجهد الزائد Crowbar

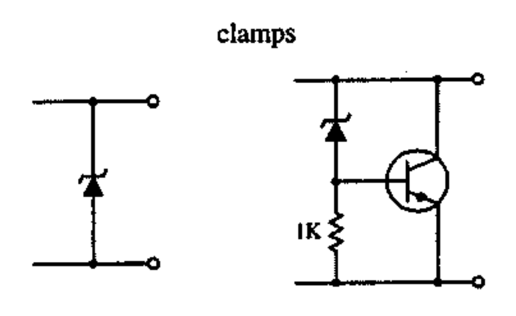
عند زيادة الجهد عن جهد انهيار الزينر بحوالي (0.6 V) ينهار الزينر ويمرر تيار قدح إلى بوابة الثايرستور فينتقل الثايرستور إلى حالة (on) ويمرر التيار إلى الأرض (يقصر التيار إلى الأرض ويمنعه من المرور عبر الحمل). يبقى الثايرستور SCR في حالة (on) حتى توقيف مصدر التغذية عن العمل (turn off) أو يمكن قطع الثايرستور بقطع التيار المار فيه عن طريق مفتاح ضغط (push-button) يوصل على التسلسل مع الثايرستور.



الشكل (15.10): دارة حماية من الجهد الزائد

دارة القص CLamp

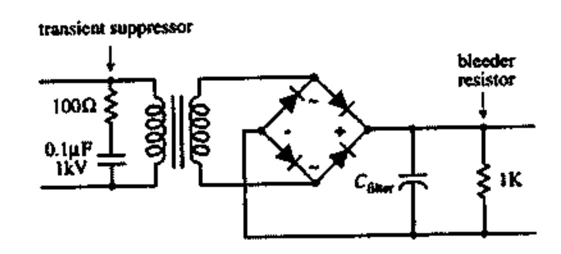
يمكن استخدام ديود زينر على التوازي مع خرج المنظم للحماية من الجهد الزائد ولكن هذا الديود يمكن أن ينهار إذا كان التيار غير المنظم كبيراً جداً. يستخدم ترانزستور استطاعي لحماية الزينر من الانهيار. عندما يزيد الجهد عن جهد انهيار الزينر يمر جزء من تيار الزينر عبر قاعدة الترانزستور فيقود هذا التيار الترانزستور إلى حالة تمرير ويمرر تيار كبير عبر المجمع إلى الباعث إلى الأرض. يؤدي استخدام دارة القص إلى التخلص من القدح الخاطئ الناتج عن القفزات الجهديّة والفرق بين دارة القص ودارة الحماية من الجهد الزائد (Crowbar) هو حاجة دارة الحماية من الجهد الزائد دوماً إلى تصفير reset (توقيف عن العمل) بعد كل حالة عمل لأن الثايرستور لا يقطع من تلقاء نفسه.



تابع الشكل (15.10): دارات قص

مقاومة النزوف وكوابت الحالة العابرة

عندما توصل مقاومة بين طرفي خرج مصدر تغذية غير منظم، فإن هذه المقاومة تعمل على تفريغ شحنة مكثف التنعيم الموجود في دارة مصدر التغذية عندما يفصل المصدر عن التغذية الكهربائية ويوقف عن العمل وكذلك عندما يُفصل الحمل عن خرج المصدر. تسمى هذه المقاومة باسم مقاومة التروف (bleeder resistor) لأنها تستترف شحنة المكثف، وغالباً يتم اختيار مقاومة $(1K\Omega, \frac{1}{2}W)$ للقيام بهذه الوظيفة. توصل بين طرفي ابتدائي محول مصدر التغذية مقاومة على التسلسل مع مكثف، كما في الشكل (16.10) وتمنع دارة RC هذه تشكل الجهود التحريضيّة العابرة الكبيرة والمؤذية عند توقيف مصدر التغذية عن العمل. يجب أن يكون معدّل الجهد للمكثف عالياً. تستخدم مقاومة 100 Ω ومكثف 1 kV - 0.1 μF. يمكن طبعاً استخدام كوابت خاصة للحالات العابرة كما ذُكر سابقاً في هذا الكتاب.

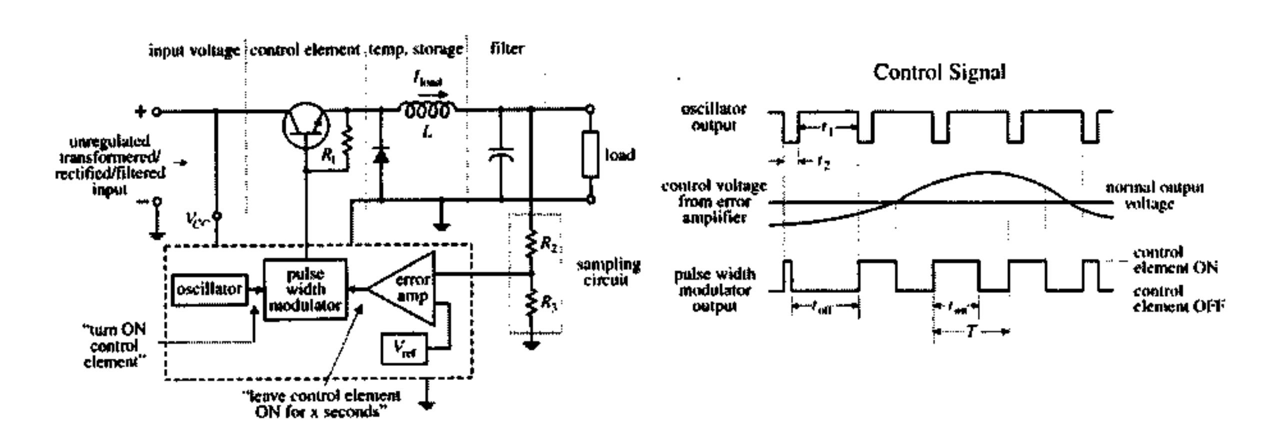


الشكل (16.10): دارة توضح استخدام مقاومة استنزاف وكابت حالة عابرة.

8.10 مصادر التغذية ذات المنظم التقطيعي

إن مصدر التغذية التقطيعي، أو المقطع (switcher) هو نوع من مصادر التغذية الفريدة يُعطي مردوداً في تحويل الطاقة يفوق مردود مصادر التغذية الخطيّة المدروسة في هذا الفصل. في منظمات مصادر التغذية الخطية يتم تخفيض جهد الدخل المستمر ــ الأعلى من جهد الخرج المستمر المطلوب ــ إلى جهد مستمر مناسب في الخرج، وعند تخفيض الجهد يتم تبديد جزء لا بأس به من الطاقة على شكل حرارة في دارة المنظم، ويكون مردود تحويل الطاقة في المنظمات التقليدية (P_{out}/P_{in}) عادة أقل من (% 50)، وهذا يعني أن أكثر من نصف الطاقة يضيع على شكل حرارة، أما في المنظمات التقطيعية فإن المردود يزيد عن (% 85)، وهذا يعني بوضوح أنها أكثر كفاءة من المنظمات الخطيّة. تمتاز المنظمات التقطيعيّة بأن لها مجالاً جهدياً وتيارياً واسعاً ويمكن أن تعمل في نظام الرفع (step-up) (جهد الخرج أكبر من جهد الدخل)، أو في نظام الخفض (step-down) (جهد الخرج أصغر من جهد الدخل)، أو في النظام العاكس (inverting) وتعطي في هذه الحالة جهد خرج يعاكس بالقطبية جهد الدخل. يمكن أن تعمل المنظمات التقطيعيَّة مباشرة من خط التغذية المتناوب (ac) دون الحاجة إلى محول استطاعي (power transformer)، وبذلك يمكن التخلص من المحول الثقيل الوزن، مما يجعل مصادر التغذية التقطيعية خفيفة وصغيرة، ولذلك تستخدم في تغذية الحواسيب (computers) وغيرها من الأجهزة.

هناك أوجه شبه عديدة بين المنظم التقطيعي والمنظم الخطي، إلا أن المنظم التقطيعي له ميزتان فريدتان هما وجود ملف تخزين طاقة ودارة التنظيم غير الخطيّة. في المنظمات الخطية يتم تنظيم جهد الخرج عن طريق تغيير مقاومة عنصر التحكم الموجودة في المنظم، أما في المنظم التقطيعي فيوجد نظام تنظيم (regulation system) يتم فيه وصل وفصل (on and off) عنصر التحكم بشكلٍ سريع جداً. تقاد نبضات الوصل والفصل بواسطة هزاز (Oscillator) ومضخم خطأ (error amplifier)، ومعدِّل عرض نبضة (puls-width modulator). انظر الشكل (17.10).



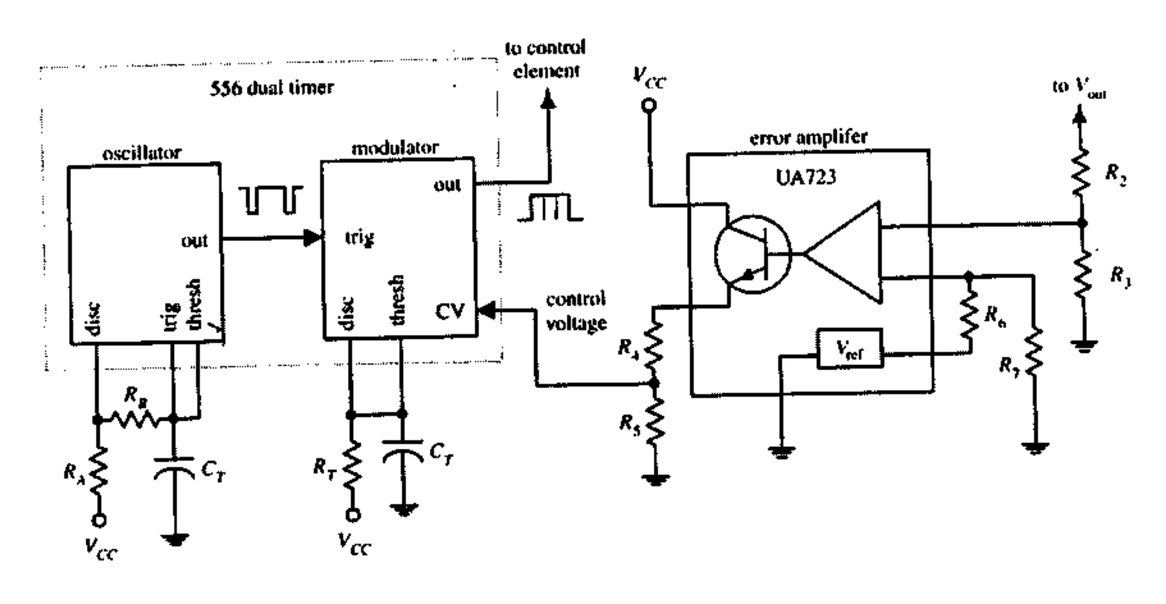
الشكل (17.10): دارة منظم تقطيعي.

تُضخ الطاقة إلى الملف خلال دورة الوصل (on-cycle) وتخزن الطاقة في الحقول المغناطيسيَّة حول الملف، وعندما ينتقل عنصر الوصل إلى حالة قطع (off) يقوم الديود بتوجيه الطاقة المخزونة في الملف إلى المرشح وإلى الحمل. تعمل المقاومات (R2) و(R3) كمقسم جهد يأخذ عينة (Sample) من جهد الخرج ويُطبقها على أحد مداخل مكبر الخطأ. يقارن المكبر هذا الجهد مع جهد مرجعي مطبق على دخله الآخر، فإذا كانت عينة جهد الخرج أصغر من الجهد المرجعي فإن مكبر الخطأ يزيد جهد خرجه الذي يستخدم كجهد تحكم، ويطبق جهد التحكم على مدخل معدِّل عرض النبضة.

إذا كان جهد العينة أكبر من الجهد المرجعي فإن المضخم يُخفض جهد خرجه.

يقوم الهزاز وطيلة فترة التشغيل بتوليد سلسلة ثابتة من نبضات القدح الجهديَّة، وتطبق هذه النبضات على معدِّل عرض النبضة. يولد المعدِّل في خرجه إشارة (on/off) معدَّلة (modified) تطبق على قاعدة عنصر التحكم. تمثل إشارة قاعدة عنصر التحكم نبضات مربعة وفيها يتعلق زمن الـــ (on) بجهد الخطأ المطبق على دخل المعدِّل. إذا كان جهد الخطأ (error-voltage) منخفضاً، أي إذا كانت العينة الجهدية أكبر من الجهد المرجعي، أي أكبر مما يجب أن تكون فعلاً، فإن المعدِّل يولد نبضات ضيقة تقود عنصر التحكم، أما إذا كان جهد الخطأ عالياً (ومعنى ذلك أن جهد العينة أصغر مما يجب أن يكون عليه فعلاً)، عندها يولد المعدِّل نبضات عريضة تقود عنصر التحكم.

إن استخدام سلسلة نبضات (on/off) التي يمكن التحكم بترددها واستمراريتها (زمن النبضة) هو الذي يُعطي للمنظم التقطيعي مردوده الاستثنائي لأن إطلاق سلسلة من نبضات الطاقة القصيرة خلال زمن أكثر مردوداً وفعالية من تطبيق جهد زائد عن اللزوم على دارة تنظيم وتبديد الفرق في الطاقة كحرارة، يبيِّن الشكل (18.10) دارة منظم تقطيعي، وفيه يمكن استخدام الدارة المتكاملة (556) التي تحوي مؤقتين ضمن غلاف واحد. يستخدم أحد المؤقتين كهزاز والآخر كمعدِّل عرض نبضة. كما تستخدم الدارة المتكاملة UA723 (منظم جهد) كمكبر خطأ. تتكون دارة أخذ عينة الجهد من المقاومات (R6) و(R7) أما (R4) و(R5) فتحدِّد جهد خرج مكبر الخطأ الذي يطبق على أحد مداخل معدِّل عرض النبضة.



الشكل (18.10): مخطط تفصيلي لدارة منظم تقطيعي.

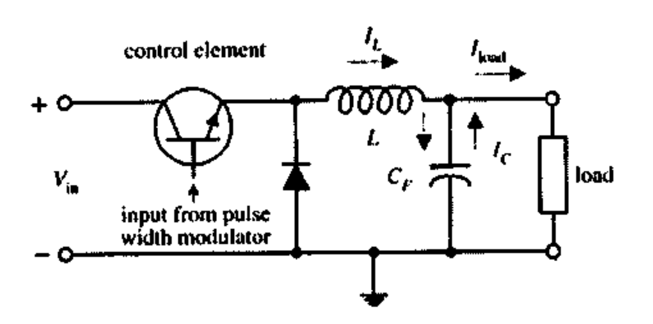
توصيلات المنظم التقطيعي الرافع، الخافض والعاكس

إن دارة المنظم التقطيعي المبينة في الشكل (17.10) هي منظم خافض وتستخدم عندما نريد أن يكون جهد الخرج المنظم أصغر من جهد الدخل غير المنظّم. تتوفر المنظمات التقطيعية بأنواع مختلفة منها المنظمات الرافعة والتي تستخدم عند الحاجة إلى الحصول على جهد خرج أكبر من جهد الدخل والمنظمات العاكسة للقطبيَّة عندما نريد أن نحصل على جهد خرج معاكس بالقطبيَّة لجهد الدخل (الدخل مثلاً V 5+، ونريد الحصول على V 5-).

وفيما يلي نتعرف باختصار على التوصيلات الثلاث.

المنظم الخافض Step-down regulator

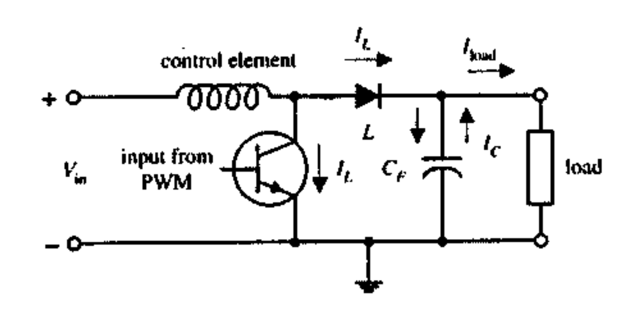
يستخدم هذا المنظم عندما يكون جهد الخرج المطلوب أصغر من جهد الدخل. عندما يكون عنصر التحكم في حالة (on) يُخزِّن الملف الطاقة ويساعد الملف على تزويد الحمل بالتيار ويؤمن تياراً لمكثف الترشيح. عندما يُقطع عنصر التحكم فإن القدرة المخزونة في الملف هي التي تزوِّد الحمل بالتيار وعندما تنتهي الطاقة المخزونة في الملف يقوم المكثف (C_F) بتزويد الحمل بالتيار.



الشكل (19.10): دارة منظم تقطيعي خافض.

منظم تقطيعي رافع

يُستخدم هذا المنظم عندما يكون جهد الخرج المطلوب أكبر من جهد الدخل. عندما يكون عنصر التحكم في حالة (on) تخزن الطاقة في الملف ويُزوَّد الحمل المعزول بالديود، بالتيار المطلوب من المكثف (C_F). عندما يقطع عنصر التحكم فإن الطاقة المخزونة في الملف تُضاف إلى طاقة جهد الدخل، ويؤمن (L) تياراً للحمل وللمكثف (C_F). يقوم (C_F) بتزويد الحمل بالتيار عندما يكون عنصر التحكم في حالة قطع وعندما تفرَّغ الطاقة المخزونة في الملف (L).

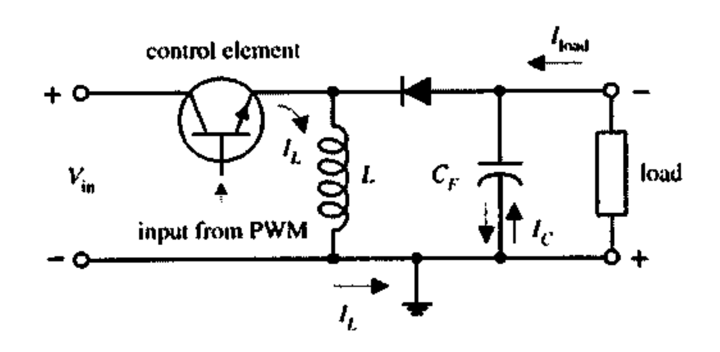


الشكل (20.10): دارة منظم تقطيعي رافع.

منظم تقطيعي عاكس للقطبية

يستخدم هذا المنظم عند الرغبة في الحصول على جهد خرج معاكس بالقطبية لجهد الدخل. عندما يكون عنصر التحكم في حالة (on) تخزن الطاقة في الملف، ويقوم الديود بعزل الملف عن الحمل، ويتم تأمين تيار الحمل من المكثف المشحون (C_F). عندما يصبح عنصر التحكم في حالة قطع فإن الطاقة المخزونة في الملف تشحن المكثف (C_F) بقطبيّة تجعل جهد الخرج سالباً. يؤمن (I_L) تيار الحمل وتيار شحن للمكثف الذي يكون في هذه الحالة في وضع أو حالة تفريغ للطاقة. تؤمن (C_F) تيار الحمل عندما يكون عُنصر التحكم في حالة قطع (off) والملف مشحوناً.

يمكن تصميم المنظم المقطع العاكس ليكون إما رافعاً أو خافضاً للجهد.



الشكل (21.10): دارة منظم تقطيعي عاكس.

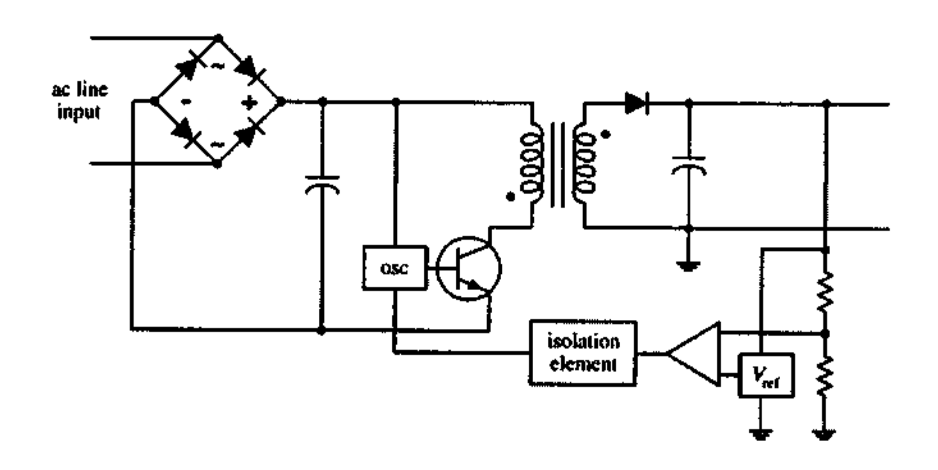
إلغاء الحاجة إلى محول الـ 60 هرتز الثقيل

يمكن باستخدام الفعل التقطيعي للمقطع تصميم مصدر تغذية لا يحتاج إلى محول استطاعي (60 Hz) ثقيل في مرحلة الدخل، وبكلام آخر يمكنك تصميم مصدر تغذية تقطيعي يعمل مباشرة من خط الجهد المتناوب (120 V ac) أو (220 V ac) ولكن يجب تقويم الجهد المتناوب وترشيحه قبل تطبيقه على المنظم المقطّع، ولكن إزالة المحول تزيل العزل الواقي (protective isolation) بين خط التغذية المتناوب وجهد الدخل المستمر الذي سوف يُطبق على المنظم. وبدون هذا العزل فإن جهد الدخل المستمر للمنظم (جهد خرج المقوِّم) سيكون حوالي (160 V) — إذا كان جهد الدخل المتناوب 120 V — ولتجنب هذه الحالة تُعدَّل دارة المنظم التقطيعي. تُستخدم طريقة عزل جديدة تعتمد على استبدال الملف التقليدي في دارات المنظمات التقطيعية بثانوي محول تردد عالي مع استخدام محول تردد عالي آخر أو عازل ضوئي (optoislator) لوصل التغذية العكسيَّة من مضخم الخطأ إلى العنصر المعدِّل (انظر الشكل 22.10).

قد تتعجب الآن لأن الدارة قد تخلصت من محول الدخل ولكنها تحتاج إلى محول بعد المقوِّم (إن لم يكن إلى محولين) فكيف إذن يصبح حجم مصدر التغذية ووزنه أقل؟

في الواقع تؤدي زيادة تردد الجهد المطبق على المحول إلى تخفيض حجم النواة الحديدية اللازمة ووزنها (لأن الحقول المغناطيسيَّة على الترددات العالية لا تحتاج إلى مساعدة كبيرة من النواة كي تنتقل من الابتدائي إلى الثانوي). يمكننا استخدام محولات عالية التردد لأن هزاز المقطع (Switcher oscillator) يعمل على تردد حوالي 65 kHz ولذلك يكون الفرق في الحجم والوزن كبيراً بين مصدر تغذية تقطيعي ومصدر تغذية عادي يستخدم محول 60 Hz، فمثلاً يبلغ حجم مصدر تغذية تقطيعي استطاعته (500 W) حوالي ($640\ in^3$) مقابل ($1520\ in^3$) لمصدر تغذية عادي يُعطي نفس الاستطاعة. كما أن مصادر التغذية التقطيعية تعمل دون أن ترتفع درجات حرارتها كما ترتفع في مصادر التغذية الخطيّة العاديّة. يُعبَّر عادة عن نسبة الاستطاعة إلى واحدة الحجم في مصادر التغذية وهي في مصادر التغذية التقطيعية حوالي ($0.9\ W/in^3$) أما في المصادر العادية فهي ($0.4\ W/in^3$). توجد مشكلة بسيطة في مصادر التغذية التقطيعيّة تجب الإشارة

إليها، وهي وجود تموجات في جهد الخرج بسبب الطبيعة النبضيَّة (on/off) للمنظم التقطيعي، وعادة تكون هذه التموجات من مرتبة عشرات الميللي فولت، ولكنها لا تسبب مشاكل تذكر (لأن هامش التأرجح المسموح في الدارات المتكاملة الحساسة 200 mV مثلاً لا يتم تجاوزه). إذا ظهرت أية مشاكل بسبب هذا التموج يوصل مع الخرج مرشح تمرير منخفض عالي التيار.



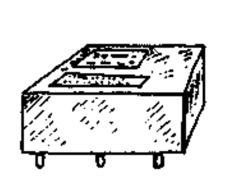
الشكل (22.10): نموذج معدّل لمصدر تغذية تقطيعي.

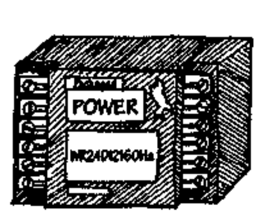
9.10 أنواع أغلفة مصادر التغذية التجارية

إذا كنت لا ترغب بتصميم وتصنيع مصدر تغذية بنفسك، يمكن شراء مصدر تغذية جاهز. تتوفر مصادر تغذية إما من النوع الخطي (تقليدي) أو من النوع التقطيعي وتوجد بأنواع مختلفة من الأغلفة، وستتعرف فيما يلي على بعض نماذج الأغلفة المتوفرة.

وحدات التغذية الصغيرة

تستخدم هذه الوحدات في التطبيقات منخفضة الاستطاعة (مثلاً V 5 ± ؛ V 10 ± ؛ V 15 ±). يُوضع مصدر التغذية ضمن علبة بأبعاد (2.5 × 3.5 × 1 in). تزوَّد وحدات التغذية هذه بأسلاك خرج ذات نهايات صلبة (pin like leads) بحيث يمكن وصلها مباشرة إلى بطاقات دارات الاختبار، أو تزوَّد بشرائح طرفية ذات براغي لوصل أسلاك بنهايات مناسبة معها. يمكن أن تعطي وحدات التغذية هذه جهداً وحيداً (مثلاً V 5 +) أو جهدين (مثلاً V 15 ±) أو ثلاثة جهود (مثلاً V 5 + ؛ V 15 ±). تتراوح استطاعات وحدات التغذية الخطية من هذا النوع بين (1) و (10 W)، أما وحدات التغذية التقطيعية فلها استطاعة تتراوح بين (10) و(25 W).

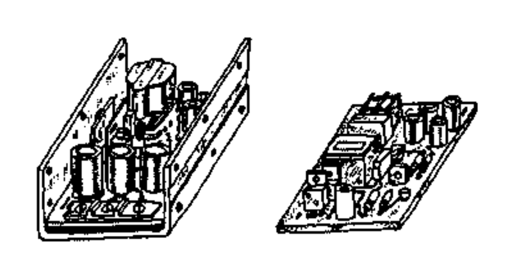




الشكل (23.10): أشكال وحدات التغذية الصغيرة.

وحدات التغذية ذات الغلاف (الإطار) المفتوح

تُركب بطاقة دارة مصدر التغذية والمحول وغيرها من الأدوات على قاعدة معدنية (إذا كانت وحدة التغذية منخفضة الجهُد، يمكن ببساطة تركيبها على بطاقة الدارة) يتم إدخالها ضمن الجهاز الذي سوف تغذيه، تتوفر مصادر التغذية هذه من النوع الخطي أو التقطيعي وبمجال واسع من الجهود، والتيارات ومعدلات الاستطاعة حوالي 10 إلى 200 W للمصادر الخطيّة و20 إلى 400 W للمصادر التقطيعيّة.

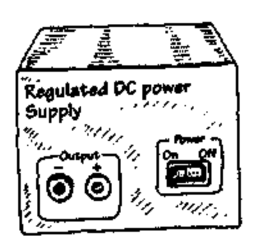


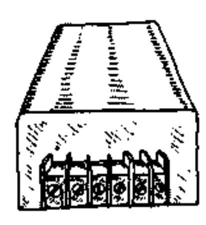
الشكل (24.10): أشكال وحدات التغذية المكشوفة.

وحدات التغذية المغلقة

توضع وحدات التغذية هذه في صناديق معدنية مصممة خصيصاً لتبديد الحرارة الزائدة، وتتوفر من النوع التقليدي الخطي والتقطيعي.

تتراوح معدلات الاستطاعة بين 10 و800 W للمصادر الخطية و(20) إلى (1500 W) للمصادر التقطيعيَّة.



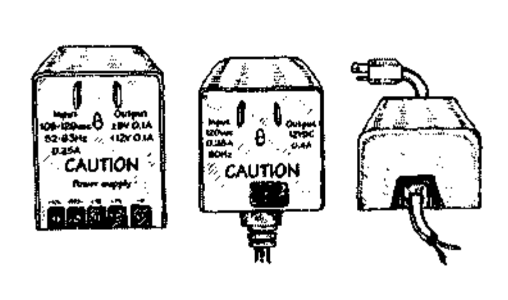


الشكل (25.10): شكل مصدر تغذية مغلق.

مصادر التغذية التي توصل مباشرة مع المأخذ الجداري

يمكن وصل مصادر التغذية هذه مباشرة مع المأخذ الكهربائي المتناوب الموجود في الجدار وتختلف أنواعها فمنها ما يحوي فقط على محول جهد متناوب وبعضها الآخر يحوي مصدر تغذية غير منظم، والبعض منها يحوي مصدر تغذية منظم. تتوفر وحدات تغذية ذات خرج منظم من النوع التقليدي الخطي أو التقطيعي، أما قيم جهود الخرج النموذجيَّة لهذه الوحدات فهي 3 V +، 5+ V، 6 V+ ؛ 7.5 V+ ؛ 9 V+ ؛ 12 V+ و 15 V+ .

كما تتوفر أنواع منها تؤمن جهود خرج ذات قطبية مزدوجة.

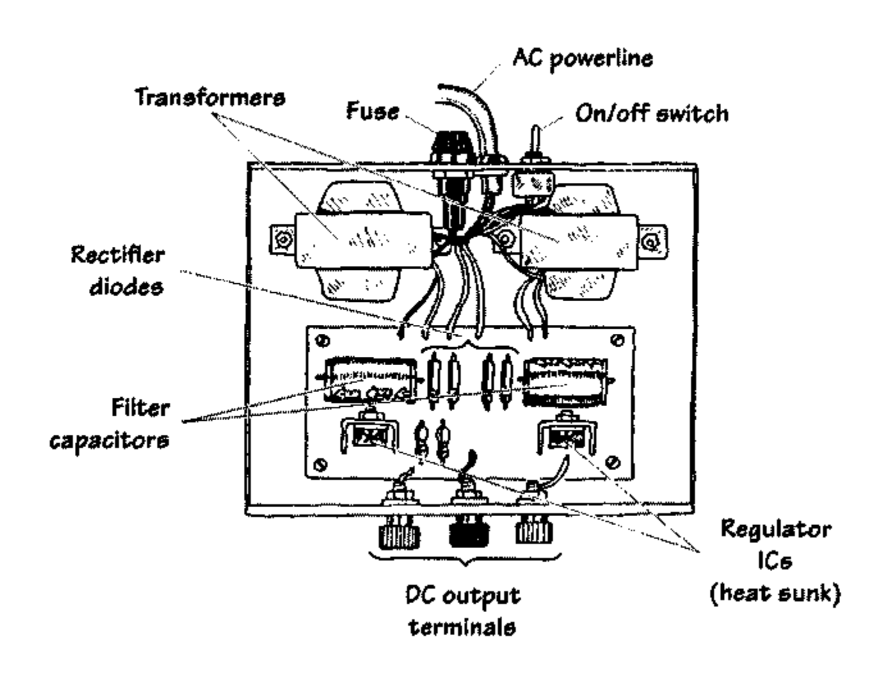


الشكل (26.10): أشكال وحدات التغذية الجدارية

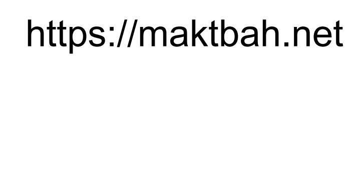
10.10 بناء مصدر تغذية

نقدم إليك فيما يلي بعض الاقتراحات التي يمكن أن تساعدك عند بناء وحدة تغذية بنفسك.

1) ركب المحول في العلبة المعدنية مباشرة إلى جوار الجدار الخلفي.
2) ركب مفتاح وصل التغذية وأقطاب التوصيل لخطوط الجهد المتناوب والفاصمة على الوجه الخلفي للصندوق (أو العلبة).
3) ركب بطاقة الدارة على حوامل ضمن الصندوق.
4) ضع الديودات أو المقومات والمكثفات ودارة تنظيم الجهد على دارة واحدة (بطاقة واحدة).
5) تأكد من تركيب مبردات لمنظمات الجهد.
6) ركب مآخذ الجهود المستمرة على الوجه الأمامي للعلبة.
7) اثقب فتحات في الصندوق للسماح بمرور الهواء.
8) مرِّر كابل التغذية المتناوب عبر فتحة في الجدار الخلفي للعلبة واستخدم عازلاً مطاطياً محيطاً بإطار الثقب الذي يدخل منه كابل الجهد المتناوب.
9) أرِّض الصندوق.
10) مرِّر كابل التغذية المتناوب وكافة الأسلاك الحاملة للجهد (120 V) أو (220 V) دوماً ضمن أنبوب عازل مقاوم للحرارة.



الشكل (27.10): توضع العناصر في جهاز تغذية.



11

الإلكترونيات الصوتية

تهتم الإلكترونيات الصوتية بتحويل الإشارات الصوتية (Sound signals) إلى إشارات كهربائية، وتتم عملية التحويل هذه عادة بواسطة الميكروفون.

وبعد أن تتم عملية تحويل الإشارة الصوتية إلى إشارة كهربائية يمكن أن تخضع لمعالجات مختلفة تتعلق بطبيعة استخدامها فيمكن مثلاً أن تُضخم الإشارة، أو أن ترشح ترددات معينة منها، أو أن تمزج مع إشارة أو إشارات أخرى، أو تحوَّل إلى إشارة مرمّزة رقمياً يمكن أن تحفظ في ذاكرة، أو يمكن أن تُعدَّل (modulate) لإرسالها لاسلكياً، ومن الممكن أيضاً استخدام الإشارة لقدح مفتاح (تفعيل مفتاح)، ترانزستور أو حاكمة، .... الخ.

تتعامل الإلكترونيات الصوتية من جانب آخر مع توليد (generating) الإشارات الصوتية من الإشارات الكهربائية، ومن أجل تحويل الإشارة الكهربائية إلى إشارة صوتية يُستخدم المصوات (speaker).

يحوِّل المصوات الإشارة الكهربائية إلى إشارة صوتية مع الحفاظ على الاستجابة الترددّية الأصلية للإشارة، وإذا لم تكن الآن مهتماً بهذه التفاصيل، قد تكون مهتماً مثلاً بتوليد إنذار صوتي بواسطة دارة كهربائية، عندها يمكنك استخدام أداة لتوليد الصوت المسموع من إشارة كهربائية مثل الرنان الذي يعمل على جهد مستمر (dc buzzer) أو (compression washer).

يمكن أن تكو ن الإشارة الكهربائية التي تستخدم لقيادة مصوات ناتجة بالأساس عن إشارة صوتية، أو يمكن أن تكون مولدة بواسطة نوع خاص من دارات الهزازات.

1.11 مقدمة عن الصوت

قبل أن تبدأ بالتعامل مع الدارات الصوتية من المفيد إجراء مراجعة لبعض المفاهيم الأساسية التي تخص الصوت. يتميّز الصوت بثلاثة عناصر أساسية هي:

التردد (frequency)، والشدة (intensity)، والنغمات التوافقية (overtone). يتعلق تردد الصوت بتردد اهتزاز الجسم الذي ينتج الصوت.

تستطيع أُذن الإنسان استقبال الأصوات ذات الترددات الواقعة في المجال بين 20 Hz و25000 Hz، ولكن الأذن أكثر حساسية للترددات المحصورة بين 1000 Hz و2000 Hz. تتعلق شدة الصوت بمقدار قدرة الصوت المنقول عبر واحدة المساحة في الثانية (W/m^2) وتتناسب مع مطال اهتزاز الجسم المهتز، وتنخفض شدة الصوت بالابتعاد عن المصدر الصوتي بشكل يتناسب مع واحد على مربع المسافة. تستطيع أذن الإنسان التمييز بين شدة تتراوح بين (10^{-12}) و$1\ W/m^2$، وبما أن

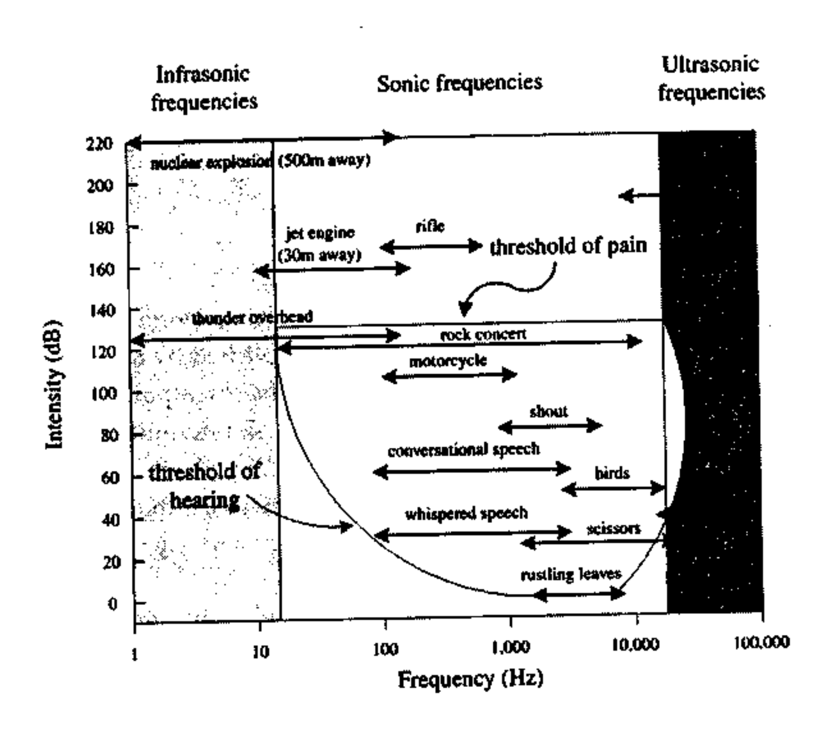
هذا المجال واسع جداً لذلك يستخدم المقياس اللوغاريتمي للتعبير عن شدة الصوت وبالطبع يستخدم الديسيبل لهذه الغاية (dB). وتعرّف شدة الصوت مقدرة بالديسيبل من العلاقة:

$$dB = 10Log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

I: شدة الصوت المقاسة مقدرة بالواط على المتر المربع.

I_0: تساوي (10^{-12} W/m²)، وهي أضعف شدة صوت تتحسسها الأذن البشرية.

وبعد التعبير عن شدة الصوت بالديسيبل نجد أن شدة الصوت التي تميِّزها الأذن البشرية تتراوح بين 0 dB و120 dB. يبيِّن الشكل 1.11 عدداً من الأصوات وتردداتها وشداتها.



الشكل (1.11): بعض الأصوات وتردداتها وشداتها.

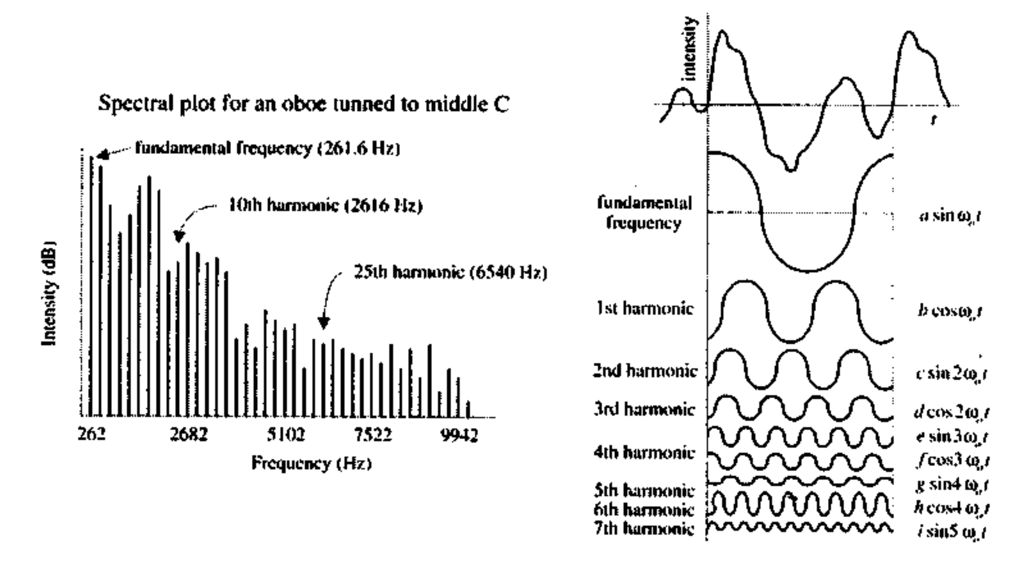
تعبِّر نوعية النغمات عن البنية الموجية المركبة للصوت والتي تنشأ عندما تتداخل التوافقيات الصادرة عن جهاز، أو عن غيره مع التردد الأساسي للصوت ولتوضيح مفهوم النغمات لنأخذ شوكة بسيطة لها تردد طنين يساوي 261.6 Hz (C متوسط). إذا اعتبرت الشوكة كمهتز مثالي (ideal vibrator) فإن الشوكة عند ضربها سوف تهتز وتطلق موجة صوتية بتردد 261.6 Hz ولا تكون هناك أية توافقيات في هذا الصوت، أي عندما تحصل على تردد واحد فقط. ولكن عند العزف على الكمان مثلاً (المجال C المتوسط) فإنك تحصل على صوت بتردد 261.6 Hz وشدة أعظمية، مع عدد من الترددات الأعلى والأقل شدة، وتسمى هذه الترددات بالتوافقيات. يُسمى التردد الأكثر شدة بالتردد الأساسي (fundamental frequency)، والتوافقيات الهامة لها ترددات من مضاعفات التردد الأساسي (كالتوافقية الثانية 2×261.1 Hz والثالثة 3×261.1 Hz والتوافقية n أي $n \times 261.1$ Hz). إن الشدة الخاصة لكل توافقية ضمن الطيف التوافقي (harmonic spectrum) لجهاز ما أو لصوت (voice) هي المسؤولة عن إعطاء الجهاز أو الصوت نوعية نغمته الخاصة. ويعود السبب إلى أن لكل جهاز مصدر للصوت نغماته الفريدة (كالأجهزة الموسيقية مثلاً). يبيِّن الشكل (2.11) الطيف التوافقي لمزمار (oboe) مولف على المجال C المتوسط ـــ التردد الأساسي. يمكن من حيث المبدأ النظري خلق صوت مشابه

لأي نوع من الأجهزة الموسيقية (مثل الكمان (violin) البوق (tuba)، البزق (banjo)، أو أية آلات غيرها) عن طريق فحص الطيف التوافقي للصوت الذي تصدره الآلة الموسيقية. ولتوضيح كيفية إجراء ذلك افرض أن لديك عدداً من الشوك المثالية (ideal forks) وأن إحدى الشوك تعطي التردد الأساسي وباقي الشوك تعطي ترددات التوافقيات المختلفة. إن استخدام الطيف التوافقي لجهاز كدليل يمكن من محاكاة صوت ذلك الجهاز بتغيير شدة كل نغمة توافقية. (إن المحاكاة الدقيقة لصوت جهاز موسيقي تتطلب معرفة أزمنة ارتفاع شدات التوافقيات وانخفاضها ولا يكفي فقط التحكم بشدة التوافقيات). يمكن رياضياً التعبير عن الصوت المركب كمجموعة من التوافقيات.

$$\text{Signal} = a \sin \omega_0 t + b \cos \omega_0 t + c \sin 2\omega_0 t + d \cos 2\omega_0 t + e \sin 3\omega_0 t + f \cos 3\omega_0 t + \ldots$$

a، b، c، d، e و f هي شدات التوافقيات أما (fo) فهو التردد الأساسي ($f_0 = \omega_0/2\pi$). تسمى المعادلة السابقة باسم سلسلة فورير. تحسب العوامل a، b، c، ... من شكل الموجة المعطى.

يوجد جهاز يسمى المحلل الطيفي (harmonic analyzer) يقوم آلياً بحساب هذه العوامل. يبيّن الشكل (2.11) صوتاً مركباً تم تكوينه من تردد أساسي وسبع توافقيات.



الشكل (2.11): طيف ترددي لمزمار، صوت مركب من سبع توافقيات

إن عملية تكوين الصوت بواسطة الأجهزة الإلكترونية هي في الواقع عملية صعبة، وكي تستطيع تقليد صوت قطار، أو صافرة، أو زقزقة طير عليك تصميم دارات إلكترونية تستطيع توليد موجات مركبة (Complex Waveforms) تحوي كافة التوافقيات بالإضافة إلى معلومات عن أزمنة ارتفاع وانخفاض شدة النغمات، ولذلك تحتاج إلى دارات هزازات ومعدلات خاصة.

2.11 الميكروفونات

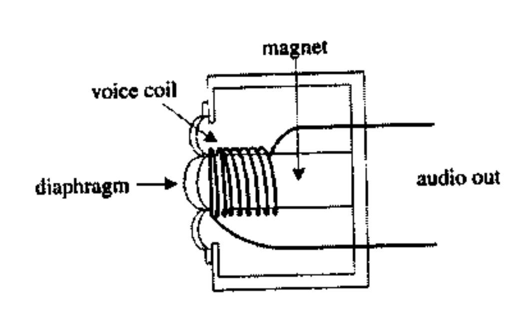
يحوّل الميكرفون الاهتزازات في ضغط الصوت إلى تغيرات في التيار الكهربائي.

يتناسب مطال الجهد المتناوب الذي يولده الميكرفون مع شدة الصوت، أما تردد الجهد المتناوب فيتعلق بتردد الصوت، وإذا كانت هناك توافقيات في الصوت فإنه ستكون لها توافقيات مقابلة في الإشارة الكهربائية.

ونتعرف فيما يلي على ثلاثة ميكرفونات شائعة الاستخدام.

الميكرفون الديناميكي

يتكون هذا النوع من الميكرفونات من صفيحة مرنة من البلاستيك، ومن ملف صوتي (voice coil) ومغناطيس دائم (permanent magnet).

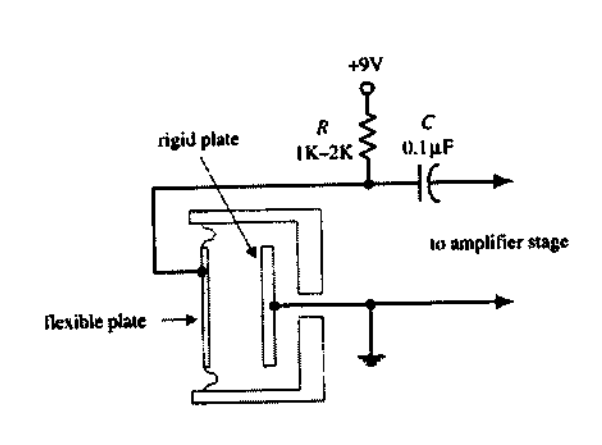


الشكل (3.11): ميكرفون ديناميكي.

توصل الصفيحة المرنة إلى إحدى نهايتي الملف الصوتي أما النهاية الأخرى للملف فإنها تكون ملفوفة حول المغناطيس أو ضمنه. عند تطبيق ضغط متناوب على الصفيحة فإن الملف الصوتي يهتز إلى الأمام والخلف استجابة لحركة الصفيحة، وبما أن الملف يتحرك ضمن الحقل المغناطيسي للمغناطيس فإن جهداً يتحرض بين طرفي الملف، ويمكن استخدام هذا الجهد لتغذية حمل صغير جداً، وعند الرغبة في قيادة حمل أكبر يتم تكبير الجهد الصوتي بواسطة مكبر. تمتاز الميكروفونات الديناميكيّة بأنها تعطي استجابة ترددية ناعمة وواسعة ولا تحتاج إلى مصدر تغذية مستمر (dc)، وتعمل بأداء جيد في مجال واسع من درجات الحرارة وممانعة خرجها منخفضة. تحوي بعض الميكروفونات ضمن جسمها على محول مما يعطيها إمكانية أن يكون لها ممانعة خرج منخفضة أو مرتفعة ويوجد مفتاح لاختيار ممانعة الخرج المناسبة. تستخدم الميكروفونات الديناميكية في الخطابات الجماهيرية وفي تطبيقات التسجيل فائقة الدقة (high fidelity).

الميكرفون المكثف

يتكون هذا الميكرفون من زوج من الصفائح المشحونة ويمكن جعل هذه الصفائح تتقارب أو تتباعد عن طريق التغيرات في ضغط الهواء، وتعمل هذه الصفائح كمكثف حساس للصوت. تُصنع إحدى الصفائح من معدن صلب وتثبت في مكانها وتؤرض أما الصفيحة الثانية فتصنع من معدن مرن وتشحن بشحنة موجبة بواسطة منبع جهد خارجي. يجب استخدام مضخم ذي ممانعة دخل عالية جداً وضجيج منخفض جداً وممانعة خرج منخفضة مباشرة بعد هذا المضخم. تؤمن الميكروفونات من هذا النوع صوتاً واضحاً ومنخفض الضجيج وتستخدم في التسجيل الصوتي عالي الجودة.

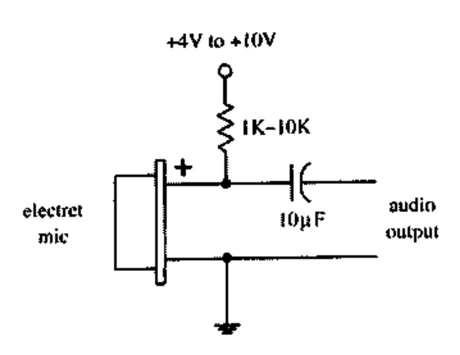


الشكل (4.11): ميكرفون مكثف.

ميكرفون اليكتريت

ميكرفون الإليكتريت هو نوع من ميكروفونات المكثف (Condenser microphone) ولكن وبدلاً من استخدام مصدر جهد خارجي لشحن الصفيحة المتحركة، فإنه يستخدم عنصر بلاستيكي مشحون بشكلٍ دائم (إلكتريت) موضوع على التوازي مع صفيحة معدنية ناقلة خلفيّة. يوجد مضخم FET داخلي في أغلب ميكروفونات الإلكترويت، ويحتاج هذا المضخم إلى تغذية كي يعمل (غالباً يكون الجهد اللازم بين 4 V + و10 V +) ويوصل هذا الجهد مع الميكروفون عبر

مقاومة تتراوح قيمتها بين (1) و(10 kΩ)، انظر الشكل. تستجيب ميكروفونات الإلكتريت بشكل رائع للترددات المتوسطة والعالية ولا تستجيب بشكلٍ جيد للترددات المنخفضة، ولذلك يقتصر استخدامها على المحادثة الصوتية وينخفض أداء الميكروفون بمرور الزمن بسبب فقدان شحنة الصفيحة.



الشكل (5.11): ميكروفون إليكتريت.

3.11 مواصفات الميكروفون

تمثل حساسية الميكروفون (sensitivity) نسبة جهد الخرج الكهربائي إلى شدة الدخل الصوتي، ويعبَّر عنها بالديسيبل بالنسبة إلى ضغط الصوت المعياري $1\ dyn/cm^2$.

الاستجابة الترددية للميكروفون هي مقياس لقدرة الميكروفون على تحويل الترددات الصوتية المختلفة إلى جهود متناوبة. وبالنسبة للكلام يكفي أن تمتد الاستجابة الترددية للميكروفون من (100 Hz) إلى (3000 Hz) أما في التطبيقات فائقة الدقة (hi-fi) فيجب أن تُغطي الاستجابة الترددية للميكروفون المجال الترددي 20 Hz إلى 20 kHz.

خاصية التوجيهية (directivity characteristic) للميكروفون تدل على جودة استجابة الميكروفون للصوت القادم من جهات مختلفة. تستجيب الميكروفونات غير الموجهة (Omnidirectional) بشكلٍ جيد للأصوات الواردة من كل الاتجاهات، أما الميكروفونات الموجهة فتستجيب بشكلٍ جيد فقط في اتجاهات محددة.

تعبر ممانعة الميكروفون (impedance) عن مقاومة الميكروفون لمرور الإشارات المتناوبة وإذا كانت ممانعة الميكروفون أقل من 60 Ω، فإنه يُصنف من الميكروفونات منخفضة الممانعة، أما إذا كانت الممانعة بين 9600 Ω — 10000 Ω فيصنف الميكروفون ضمن الميكروفونات متوسطة الممانعة، أما إذا كانت الممانعة أكبر من 10000 Ω فإن الميكروفون يكون من النوع عالي الممانعة. يتم في النظم الصوتية الحديثة وصل ميكروفون منخفض الممانعة مع جهاز بمقاومة دخل أعلى (مثلاً ميكرفون 50 Ω مع مازج 600 Ω) ولا يكون مرغوباً وصل ميكروفون عالي الممانعة مع جهاز له مقاومة دخل أخفض. في الحالة الأولى لا تكون هناك ضياعات عالية للإشارة، أما في الحالة الثانية فتكون الضياعات كبيرة، وتقول القاعدة العامة في مثل هذه الحالات إن مقاومة الحمل يمكن أن تكون عشرة أضعاف مقاومة المصدر، ويُنصح بإلقاء نظرة على تلاؤم الممانعات لاحقاً في هذا الفصل.

4.11 المضخمات الصوتية

تحتاج الإشارات الكهربائية التي نحصل عليها من الدارات الكهربائية الصوتية إلى تضخيم كي تصبح قادرة وبكفاءة على قيادة عناصر ودارات أخرى، وربما تكون الوسيلة الأسهل والأكثر كفاءة لتضخيم إشارة هي استخدام مضخم عملياتي، ويمكن أن يعمل المضخم العملياتي 741 بشكلٍ جيد في العديد من التطبيقات الصوتية، ولكنه يمكن أن يسبب تشويهاً

وغيره من التأثيرات غير المرغوبة عندما تكون الإشارة الصوتية مركبة (Complex). إن الخيار الأفضل للتطبيقات الصوتية هو استخدام مضخم عملياتي صوتي مصمم خصيصاً للتعامل مع الإشارات الصوتية. تمتاز المضخمات الصوتية بأن لها معدل تباطؤ (slew rate) عالياً جداً، ربح عرض حزمة كبيراً، وضجيج دخل منخفضاً جداً. يوجد العديد من المضخمات العملياتية الجيدة التي تنتجها جهات متعددة ومنها AD842، AD847، AD845، AD797، NE5535، OP-27، LT1115، LM833، OPA2604، OP249، HA5112 وLT1057.

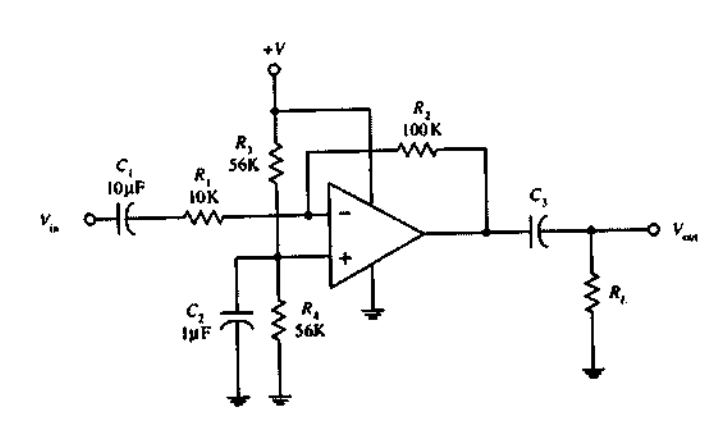
المضخم العاكس

تعمل الدارتان التاليتان كمضخمات عاكسة، والربح في الدارتين يساوي (-R2/R1)، انظر الفصل السابع. مقاومة الدخل تساوي تقريباً R_1.

تستخدم الدارة الأولى مصدري جهد تغذية، أما الدارة الثانية فتستخدم مصدر تغذية واحداً.

مضخم عاكس بمصدري تغذية

يعمل المكثف C_1 في الدارتين كمكثف ربط (Coupling Capacitor)، يمرر الإشارة المتناوبة (ac) ويمنع مرور الإشارات المستمرة (dc) من المراحل السابقة، وبدون (C_1) تؤثر الجهود المستمرة على جهد دخل المضخم العملياتي ويظهر تأثيرها في الخرج وتقود المضخم إلى الإشباع مما يؤدي إلى تشويه الإشارة المتناوبة. تساعد (C_1) أيضاً على منع الضجيج منخفض التردد من الوصول إلى دخل المضخم.



الشكل (6.11): مضخمات عاكسة.

مضخم عاكس بمصدر تغذية وحيد

في المضخم الذي يُغذى من مصدر تغذية وحيد تستخدم مقاومات استقطاب (biasing) R_3 وR_4 لمنع المضخم من القص خلال التأرجح السالب في إشارة الدخل الصوتية. وتعطي هذا المقاومات جهد الخرج مستوى مستمراً (dc level) تتأرجح حوله إشارة الخرج المتناوبة. باختيار $R_3 = R_4$ يكون المستوى المستمر في الخرج مساوياً $\frac{1}{2}(+V)$، يجب أن تكون قيم مقاومات الاستقطاب بين (10) و(100 kΩ). لمنع مستوى الجهد المستمر في الخرج من التأثير على المراحل اللاحقة يستخدم المكثف C_3 (مكثف ربط) وقيمة (C_3) يجب أن تساوي ($1/2\pi f_c R_L$) أي:

$$C_3 = \frac{1}{2\pi f_c R_L}$$

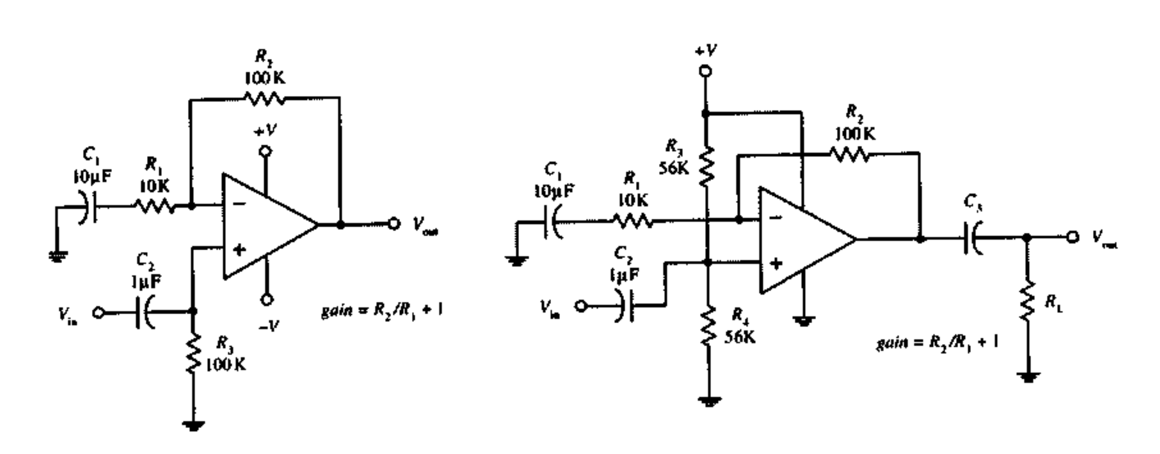
R_L: مقاومة الحمل.

f_c: تردد القطع.

يعمل المكثف C_2 كمكثف ترشيح ويستخدم لإزالة ضجيج مصدر التغذية ومنعه من التأثير على المدخل غير العاكس للمضخم العملياتي. تصمم العديد من المضخمات الصوتية بحيث تُغذى من مصدر تغذية واحد دون الحاجة إلى مقاومات استقطاب.

مضخم غير عاكس

تعمل المضخمات العاكسة السابقة بشكلٍ جيد في العديد من التطبيقات، ولكن مقاومات دخلها ليست عالية، ومن أجل الحصول على ممانعة دخل عالية (ممانعة الدخل العالية مفيدة عند وصل منبع له مقاومة عالية مع مدخلِ المضخم)، يمكنك استخدام واحدة من الدارتين المبينتين في الشكل (7.11). تستخدم الدارة اليسارية مصدر تغذية مضاعفاً، أما الدارة اليمينية فتستخدم مصدر تغذية وحيداً. ربح الدارتين يساوي ($R_2/R_1 + 1$).



الشكل (7.11): دارات مضخمات غير عاكسة.

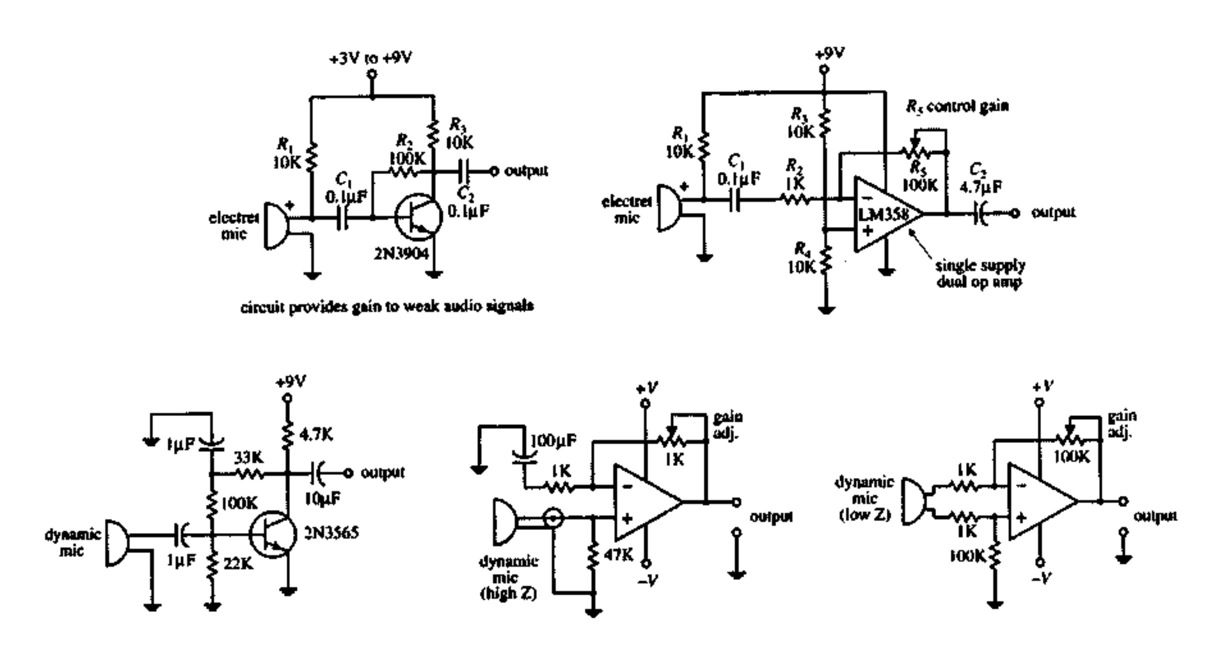
تقوم العناصر R_1، C_1، R_2 ومقاومات الاستقطاب بنفس الوظائف الواردة في دارة المضخم العاكس. ممانعة دخل المضخمات غير العاكسة عالية جداً ويمكن موافقة ممانعة الدخل بشكل أفضل مع ممانعة المصدر بواسطة C_2 وR_3 (في دارة المضخم المغذى من مصدرين) أو R_4 (في الدارة التي تغذى من مصدر وحيد). مقاومة الدخل في الدارة اليسارية تساوي R_3 تقريباً وفي الدارة اليمينية تساوي R_4 تقريباً.

5.11 المضخمات الأولية

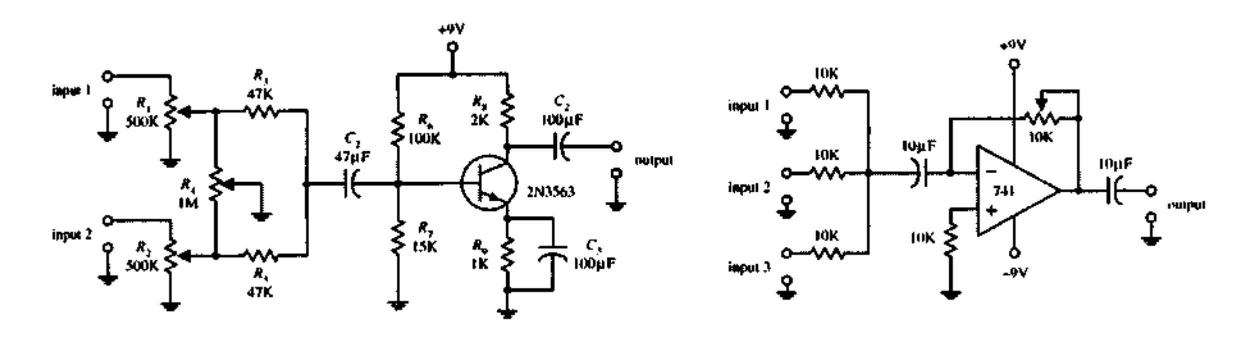
تدل عبارة المضخم الأولي في أغلب التطبيقات الصوتية على مضخم تحكم (Control amplifier) يُستخدم للتحكم بالمواصفات مثل مقاومة الدخل، والمستوى، والربح ومستويات الممانعات، نبيِّن في الشكل (8.11) بعض أنواع المضخمات الأولية التي توصل مباشرة مع الميكروفون، تدل عبارة (high Z) على أن ممانعة الميكروفون عالية (أكبر من 600 Ω).

6.11 دارات المزج

الموازج الصوتية هي أساساً مضخمات جمع (Summing amplifiers). وتجمع هذه الموازج عدداً من الإشارات المختلفة مع بعضها لتكوين إشارة خرج واحدة. تُعطى في الشكل دارتان بسيطتان تمثلان دارات مازج. في الدارة اليسارية يستخدم مضخم بوصلة باعث مشترك كأداة جمع، أما في الدارة الثانية فيستخدم مضخم عملياتي. تستخدم المقاومات المتغيرة كمتحكمات مستقلة بشدات الإشارات.



الشكل (8.11): بعض دارات المضخمات الأولية.



الشكل (9.11): دارات مزج.

7.11 ملاحظة عن تلاؤم الممانعة

هل تأمين تلاؤم الممانعات بين الأجهزة الصوتية ضروري؟ على الأقل عند وصل مصدر منخفض الممانعة مع حمل عالي الممانعة. في عصر المضخمات التي كانت تعمل على الصمامات المفرَّغة كان من الضروري تحقيق تلاؤم الممانعات لتحقيق نقل أعظمي للاستطاعة بين جهازين. يُساعد توافق الممانعات على تخفيض عدد المضخمات الصمامية اللازمة في تصميم الدارة (كمثال عدد المضخمات الصمامية اللازمة على طول خط نقل هاتفي). ولكن ومع تطور الترانزستورات ظهرت مضخمات أكثر كفاءة. والسؤال الذي يبقى قائماً ما الضروري لهذه المضخمات سابقاً وحالياً؟ إن الشيء الضروري لهذه المضخمات هو النقل الأعظمي للجهد (maximum voltage transfer)، وليس النقل الأعظمي للاستطاعة. فكر مثلاً بمضخم عملياتي بممانعة دخله عالية جداً ومقاومة خرجه منخفضة. في هذا المضخم لا يلزم تيار دخل عال لهذا المضخم كي نحصل منه على تيار خرج عال. من أجل تحقيق نقل أعظمي للجهد وجد أن مقاومة الحمل يجب أن تكوّن عشرة أضعاف مقاومة المصدر، ويُسمى هذا الشرط باسم الجَسْر (bridging)، وعند عدم تطبيق هذا الشرط، وإذا وصلنا جهازين صوتيين متساويي المقاومة (الممانعة) مع بعضهما فإن ضياع تخميد نقل الإشارة سيزيد بمقدار 6 dB، ولذلك تجد أنّ الجَسْر

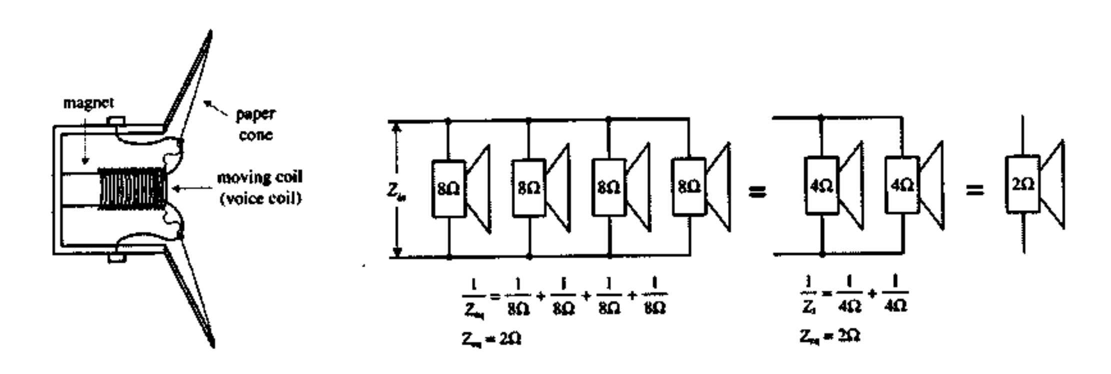
(bridging) هو طريقة التوصيل الشائعة عند توصيل التجهيزات الصوتية الحديثة مع بعضها، وتطبق هذه الطريقة في كثير من حالات الوصل الإلكترونية (وصل مصدر ــ مع حمل) ماعدا مجال الترددات الراديوية، حيث يكون من المرغوب تأمين توافق الممانعة إذا كانت الإشارة المراد نقلها إشارة تيارية أكثر من كونها جهدية. إذا كانت الإشارة المطلوب نقلها إشارة تيارية، فإن ممانعة المصدر يجب أن تكون أكبر من ممانعة الحمل. إذا كان لدينا مصدر (Source) عالي الممانعة موصول إلى حمل منخفض الممانعة (مثلاً ميكرفون عالي الممانعة موصول مع مازج منخفض الممانعة)، فإن نقل الجهد سيرافقه ضياع في الإشارة وسيكون مقدار الضياع في الإشارة يساوي

$$\text{Loss[dB]} = 20\text{Log}_{10} \frac{R_{Load}}{R_{Load} + R_{source}}$$

وكقاعدة عامة يعتبر الضياع الأقل من 6 dB مقبولاً في أكثر التطبيقات.

8.11 المصوات

المصوات هو أداة لتحويل الإشارة الكهربائية إلى إشارة صوتية، والمصوات الأكثر شيوعاً واستخداماً هذه الأيام هو المصوات الديناميكي، ويعمل المصوات الديناميكي وفق نفس مبدأ عمل الميكرفون الديناميكي. عند تطبيق تيار متغيّر على الملف المتحرك (moving coil) الذي يحيط بمغناطيس (أو الذي يحيط به مغناطيس) فإن الملف يجبر على الحركة إلى الأمام والخلف (حسب قانون فاراداي (Faraday's law)، يستجيب مخروط ورقي كبير موصول مع الملف لهذه الحركة وينتج أصواتاً.



الشكل (10.11): مصوات ديناميكي.

تُعطى ممانعة لكل مصوات تسمى الممانعة الاسمية (nominal impedance Z) وتمثل القيمة الوسطى للممانعة بين طرفي المصوات. (تتغير ممانعة المصوات حسب التردد فتزداد أو تنخفض عن القيمة الاسمية). يمكن عملياً اعتبار المصوات كمقاومة أومية بسيطة من ممانعة Z. فمثلاً عند وصل مصوات ممانعته 8 Ω مع خرج مضخم، فإن المضخم يعتبر المصوات كمقاومة حمل تساوي 8 Ω. والتيار الذي يستهلكه المصوات من المضخم سيكون:

$$I = \frac{V_{out}}{Z_{speaker}}$$

فإذا استبدل المصوات بآخر مقاومته 4 Ω يتضاعف استهلاك التيار.

إن قيادة مصواتين موصولين على التوازي مقاومة كل واحد منهما تساوي 8 Ω تكافئ قيادة مصوات واحد مقاومته (4 Ω) وقيادة مصواتين موصولين على التوازي مقاومة كل واحد منهما 4 Ω تكافئ قيادة مصوات واحد مقاومته 2 Ω. يمكن عند استخدام مضخمات جهد تغيير المقاومة التي يحسس بها المضخم كمقاومة حمل، فمثلاً يمكن وصل مقاومة 4 Ω

على التسلسل مع مصوات 4 Ω لتشكيل حمل 8 Ω، ولكن استخدام مقاومة عادية يؤذي جودة الصوت. توجد محولات ملاءمة للمصوات، وتستطيع هذه المحولات تحويل مقاومة من 4 Ω إلى 8 Ω، ولكن كلفة المحول عالي الجودة قد تكون أكبر من كلفة مصوات جديد، ويمكن أن يخفض الاستجابة الترددية، وأن يضيف بعض الأخطاء الديناميكيّة.

إن الميزة الأساسية الهامة الأخرى للمصوات هي الاستجابة الترددية، وهي المجال الترددي الذي يستطيع ضمنه المصوات إعطاء إشارات صوتية بكفاءة.

يُسمى المصوات المصمم للاستجابة للترددات المنخفضة (عادة أقل من 200 Hz) باسم (woofer)، أما مصوات الترددات المتوسطة فيصمم ليعمل في المجال من 500 Hz وحتى 3000 Hz، أما الـ tweeter أو مصوات التردد العالي فهو مصوات يُصمم للتعامل مع ترددات أعلى من مجال التردد المتوسط. تصمم بعد الأجهزة الصوتية (speakers) لكامل المجال الترددي وهي قادرة على إعادة إنتاج أصوات في المجال من 100 Hz وحتى 15000 Hz، وعادة يكون أداء المصوات المصمم لتغطية كامل المجال الصوتي أقل جودة من أداء منظومة مكونة من مصوات تردد منخفض، ومصوات تردد متوسط، ومصوات تردد عالٍ.

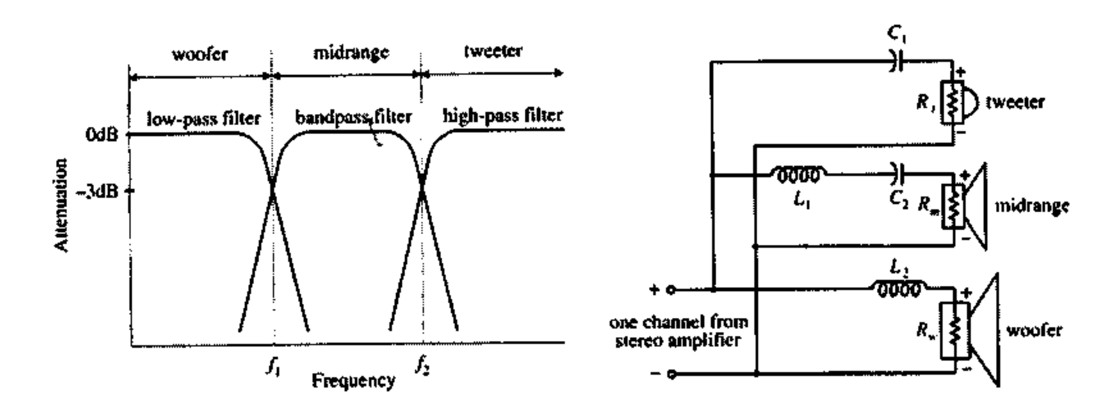
9.11 شبكات (دارات) العبور

عند الرغبة في تصميم منظومة صوتية جيدة، من الضروري استخدام مجموعة من أجهزة الصوت (speakers)، مثلاً مصوات للترددات المنخفضة، ومصوات للترددات المتوسطة، ومصوات للترددات العالية، بحيث تحصل على استجابة صوتية جيدة في كامل المجال الصوتي (20 Hz) إلى (20 kHz). إن الوصل التفرعي البسيط لأجهزة إصدار الصوت مع بعضها لن يعمل بشكل جيد، لأن كل مصوات سوف يستقبل ترددات خارج مجال استجابته الترددي الطبيعي ومن الضروري في هذه الحالة استخدام مرشحات مناسبة تمرر لكل مصوات مجال ترددات عمله المناسبة، أي تمرر الترددات المنخفضة فقط إلى (woofer)، والترددات العالية إلى (tweeter)، والترددات المتوسطة إلى مصوات الترددات المتوسطة (midrang-frequency speaker). تسمى مجموعة المرشحات التي تستخدم لهذا الغرض باسم شبكة عبور (crossover network). يوجد نوعان من شبكات العبور: شبكات العبور السلبيَّة وشبكات العبور الفعالة.

تتكون شبكات العبور السلبيَّة من مرشحات سلبية تتكون من مقاومات ومكثفات، وتوصل المرشحات بين مضخم الاستطاعة (power amplifier) وأجهزة الصوت (speakers)، وعادة يوضع المرشح في العلبة التي يُركب المصوات ضمنها. تمتاز المرشحات السلبيَّة برخص كلفتها وسهولة تصنيعها ولكنها غير قابلة للضبط (nonadjustable) وتستهلك جزءاً من قدرة المضخم. تتكون شبكات العبور الفعالة من مرشحات فعالة (مرشحات تعمل على مضخمات عملياتية) وتوضع المرشحات الفعالة في الدارة قبل المضخم الاستطاعي، وذلك لأن الإشارات تكون ضعيفة نسبياً (غير مضخمة) فيصبح تعامل المرشحات مع الإشارة أسهل.

يمكن لدارة مرشح فعال واحدة أن تقود عدة مضخمات في آن واحد، وبما أن المرشحات الفعالة تحوي عناصر فعالة كالمضخم العملياتي، فإن الإشارة لا تتخامد بسبب مرورها في دارة المرشح كما هي الحال في المرشحات غير الفعالة. يبيِّن الشكل (11.11) شبكة عبور بسيطة مستخدمة لقيادة ثلاثة أجهزة صوت.

يبيِّن الشكل منحنيات الاستجابة الترددية النموذجية لكل مصوات، ولكي يحقق النظام كاملاً الاستجابة الترددية المطلوبة الكلية يجب استخدام مرشحات تمرير منخفض، وتمرير عالٍ وتمرير حزمة. تشكل C_1 مع R_t مرشح تمرير عالٍ، أما L_1، وC_1 وR_m فإنها تشكل مرشح تمرير حزمة، في حين يتكون مرشّح التمرير المنخفض من L_2 وR_w. المقاومات R_t، R_w وR_m هي المقاومات الاسمية لأجهزة الصوت، R_t هي مقاومة مصوات التردد العالي، R_w مقاومة مصوات التردد المنخفض وR_m مقاومة مصوات الترددات المتوسطة.



الشكل (11.11): شبكة عبور، ومنحنيات استجابة للمرشحات.

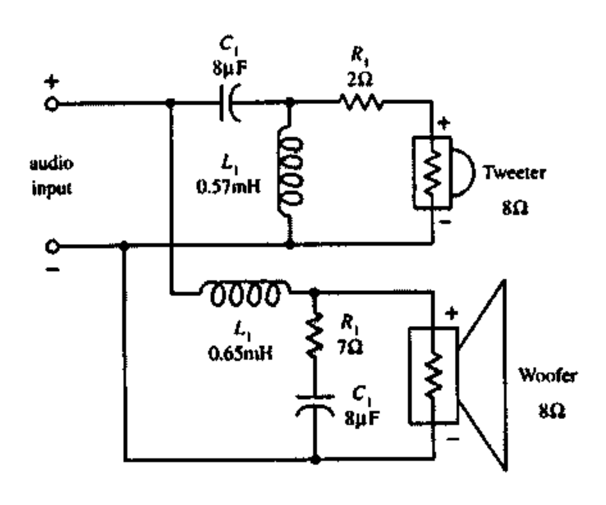
استخدم العلاقات التالية لحساب قيم العناصر اللازمة كي تحصل على الاستجابات المرغوبة:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_1 R_t}; L_1 = \frac{R_m}{2\pi f_2}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_1 R_m}; L_2 = \frac{R_w}{2\pi f_1}$$

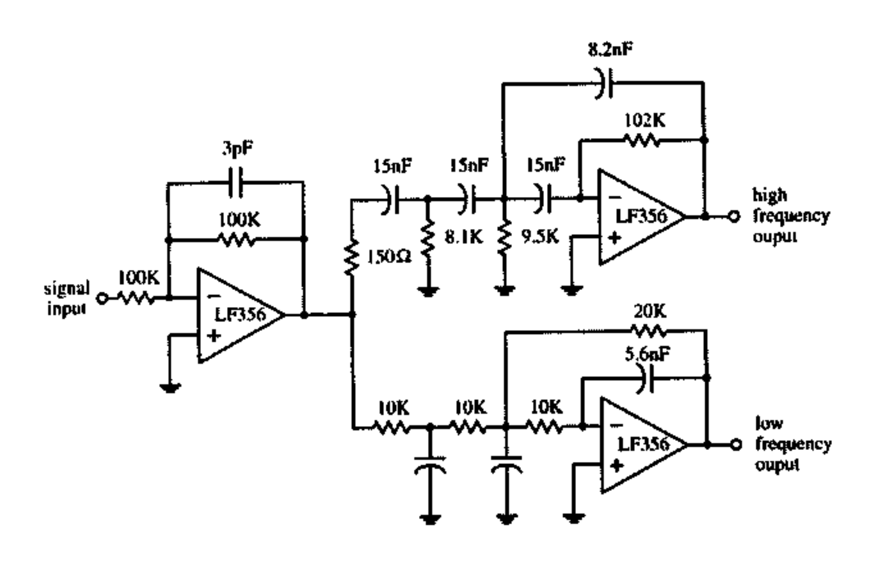
f_1، f_2 هي ترددات الـــ 3 dB- المبينة في الشكل (11-11). إنّ شبكات العبور السلبيّة تكون عادة أعقد من النماذج التي تم عرضها هنا، فيمكن أن تكون مرشحات من درجات أعلى بالإضافة إلى بعض العناصر الأخرى، مثل شبكة تعويض الممانعة (impedance compensation network)، وشبكة تخميد (attenuation network)، ومرشح حجز حزمة تسلسلي (series notch filter) وغيرها من المكونات التي تستخدم للحصول على استجابة عامة أكثر تسطحاً.

تُعطى في الشكل (12.11) شبكة عبور سلبيّة أكثر عملية من الدارة السابقة وتستخدم لقيادة مجموعة من أجهزة الصوت (speakers) مكونة من مصوات تردد عالٍ مقاومته (8 Ω)، مصوات تردد منخفض مقاومته (8 Ω)، ويمكن تصنيع صندوق من الفيبر بالأبعاد (18 × 12 × 8 in) لوضعِ هذا النظام الصوتي بداخله.



الشكل (12.11): شبكة عبور عمليّة.

أما في الشكل (13.11) فتعطى شبكة عبور فعالة لقيادة مصواتين ولهذه الشبكة تردد (-3 dB) يساوي (500 Hz) واستجابة 18 dB/octave. يُستخدم المضخم العملياتي LF356 عالي الأداء كعنصر فعال. يجب تكبير استطاعة الإشارات المأخوذة من خرج المرشحات قبل تطبيقها على المصواتين.



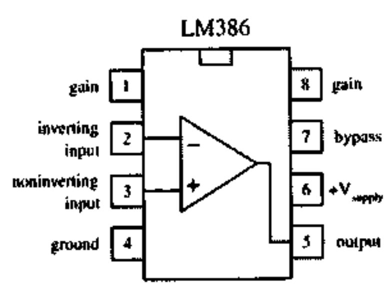
الشكل (13.11): شبكة عبور فعالة.

10.11 دارات متكاملة بسيطة لقيادة أجهزة الصوت

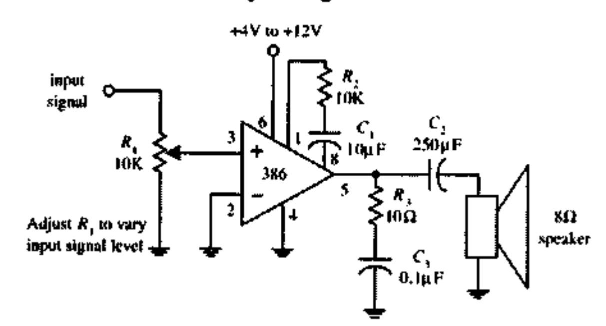
المضخم الصوتي LM386

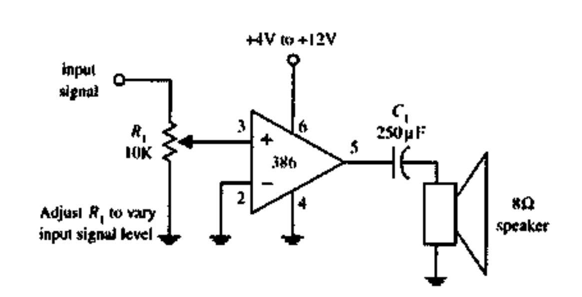
صُمِّم المضخم الصوتي LM386 بشكل خاص للتطبيقات منخفضة الاستطاعة ويستخدم جهداً مستمراً يتراوح بين (+4 V) و(+15 V) لتغذية الدارة المتكاملة. ربح المضخم LM386 مثبّت داخلياً على قيمة تساوي (20)، وذلك بعكس المضخمات الأخرى مثل المضخم 741 الذي يُضبط ربحه بمقاومات خارجيّة. ويمكن زيادة ربح الـ LM386 إلى (200) بوصل مقاومة خارجية على التسلسل مع مكثف بين الأرجل (1) و(8). تنسب جهود مداخل المضخم LM386 إلى الأرض ويتم تحميل إشارة الخرج المتناوبة داخلياً في دارة المضخم على جهد مستمر يساوي نصف جهد التغذية. هذا المضخم مصمم لقيادة مصوات مقاومته (8 Ω).

Audio Amplifier (LM386)



الشكل (14.11): دارات مضخمات صوتية. شكل الدارة المتكاملة LM386، مضخم صوتي ربحه يساوي 20، مضخم صوتي ربحه يساوي 200.





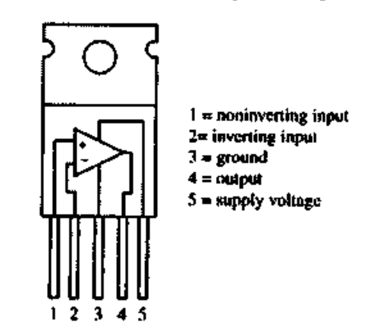
تابع الشكل (14.11): دارات مضخم صوتي ربحه يساوي 20 ومضخم صوتي ربحه يساوي 200.

المضخم الصوتي LM383

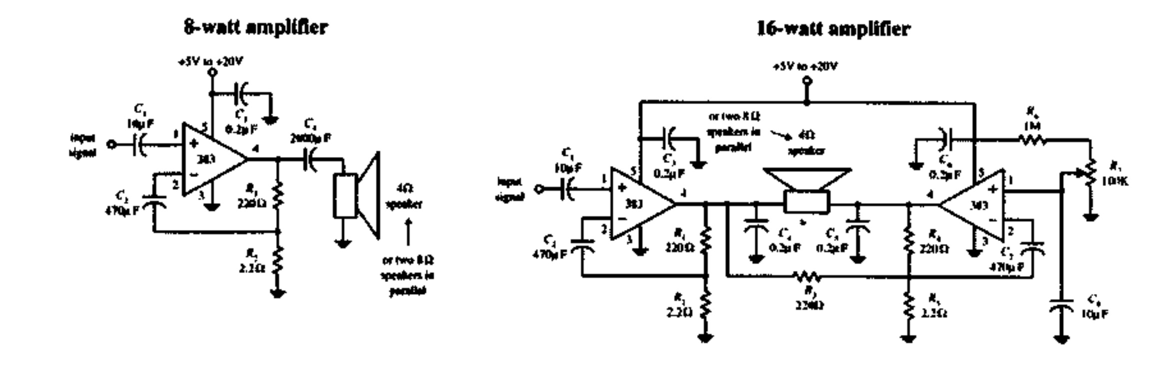
المضخم LM383 هو مضخم استطاعة مصمم لقيادة مصوات Ω 4 أو مصواتين Ω 8 موصولين على التوازي. يحوي هذا المضخم على دارة إيقاف حراري عن العمل (thermal shutdown) لحماية نفسه من التحميل الزائد (excessive loading). من الضروري تركيب مبدِّد حرارة على المضخم أثناء العمل لتجنب الانصهار (meltdown).

وتظهر على الشكل وظائف أرجل المضخم LM383 وهي:

1) المدخل غير العاكس (noninuerting input).
2) المدخل العاكس (inverting input).
3) الأرضي (ground).
4) الخرج (output).
5) جهد التغذية (supply voltage).



الشكل (15.11): شكل الدارة المتكاملة LM383.

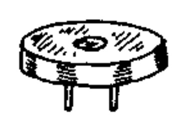


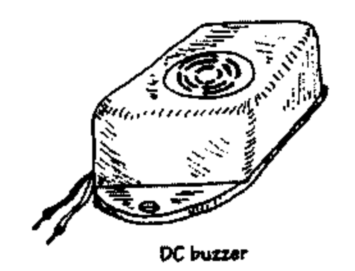
تابع الشكل (15.11): دارة مضخم W 8 ودارة مضخم W 16.

11.11 أدوات (عناصر، أجهزة) الإشارات المسموعة

يوجد عدد من عناصر الإشارات المسموعة الفريدة والتي تستخدم كمبينات إشارة إنذار، وبعض هذه العناصر تصدر نغمة مستمرة (continuous tone)، أما البعض الآخر فيصدر نغمات متقطعة (inter mitten tones)، وتستطيع أنواع أخرى توليد عدد من النغمات مختلفة الترددات مع ميزات مختلفة دورية (on/off). تتوفر عناصر الإشارات المسموعة بأنواع (ac) و(dc) وبأشكال وحجوم مختلفة. بعض هذه الأدوات ذات حجم صغير جداً ـــ لا يتجاوز حجم قطعة نقدية معدنية صغيرة. تتوفر في الكتالوكات الإلكترونية الجيدة قائمة بعناصر الإشارات المسموعة مع حجومها، وأنواع الأصوات التي تولدها، ومعدلات الـــ (dB) الخاصة بها، ومعدلات الجهد (voltage rating) بالإضافة إلى استهلاك التيار (current drain).





الشكل (16.11): بعض أنواع عناصر الإشارات المسموعة.

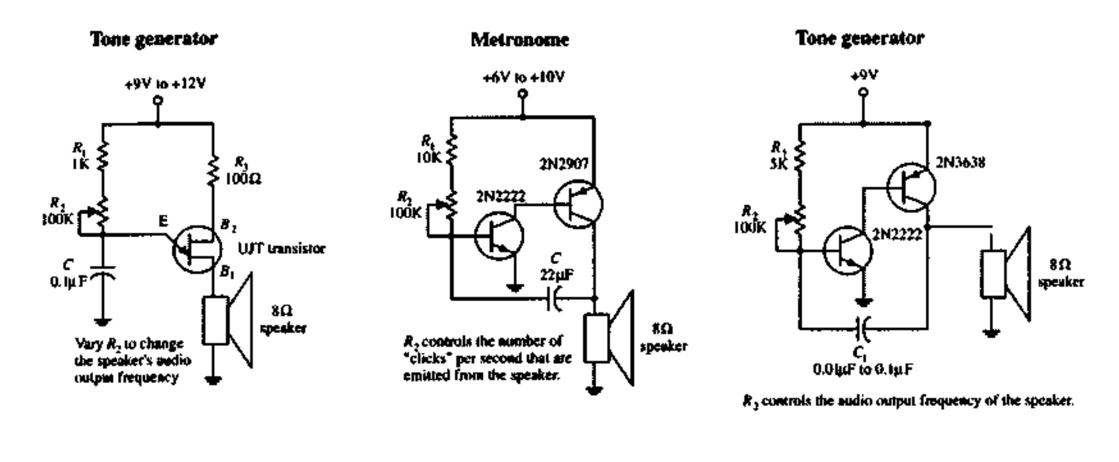
يبيِّن الشكل (16.11) بعض أنواع عناصر الإشارات المسموعة مثل الـــ Sonalret (أداة تصدر صوتاً مسموعاً)، والـــ (compression washer) والرنان الكهربائي الذي يُغذى بجهد مستمر.

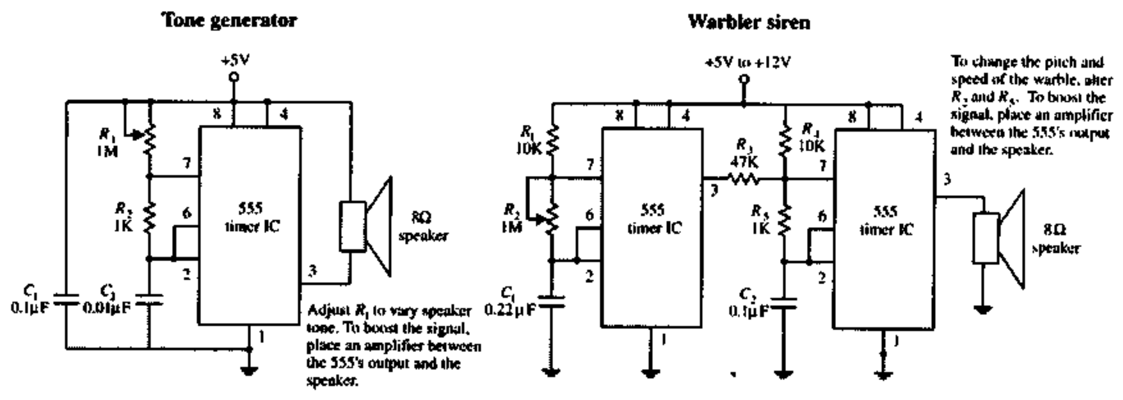
12.11 دارات صوتية متنوعة

دارات توليد نغمات بسيطة

يبيِّن الشكل (17.11) مجموعة من دارات توليد النغمات البسيط وهذه الدارات هي:

- **Tone generator** (**مولد نغمة**) يعمل على ترانزستور وحيد المتصل ويمكن تغيير تردد الخرج السمعي بتغيير المقاومة R_2.
- **Metronome** (**مولد تكتكة**) يعمل على زوج من الترانزستورات ثنائية القطبيّة (npn) و(pnp) ويمكن ضبط عدد التكات (clicks) في الثانية بضبط المقاومة R_2.
- **Tone generator** (مولد نغمة) يعمل على ترانزستورين متعاكسي القطبيَّة (npn) و(pnp) ويمكن تغيير تردد النغمة المسموعة بواسطة المقاومة R_2.
- **Tongenerator** (**مولد نغمة**) يعمل على دارة (555) ويمكن تغيير النغمة بضبط المقاومة (R_1). إذا أردت تكبير إشارة الخرج ضع مضخم استطاعة بين خرج الدارة 555 والسماعة.
- **warbler siren** (**صافرة مغرِّدة**)، ومن أجل تغيير درجة النغم وسرعة التغريد غيِّر (R_2) و(R_5)، وعند الرغبة في تضخيم إشارة الخرج يوضع مضخم استطاعة بين خرج الدارة 555 الأخيرة والسماعة.

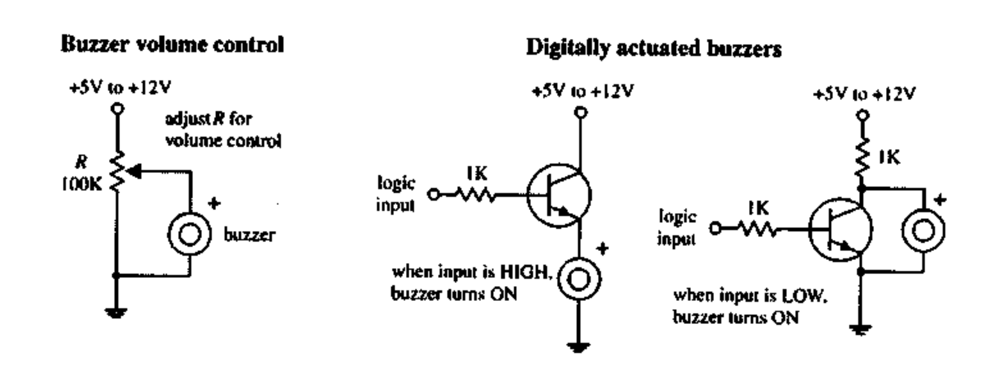




الشكل (17.11): دارات مولدات نغمات بسيطة.

دارات رنانات (اجراس) بسيطة

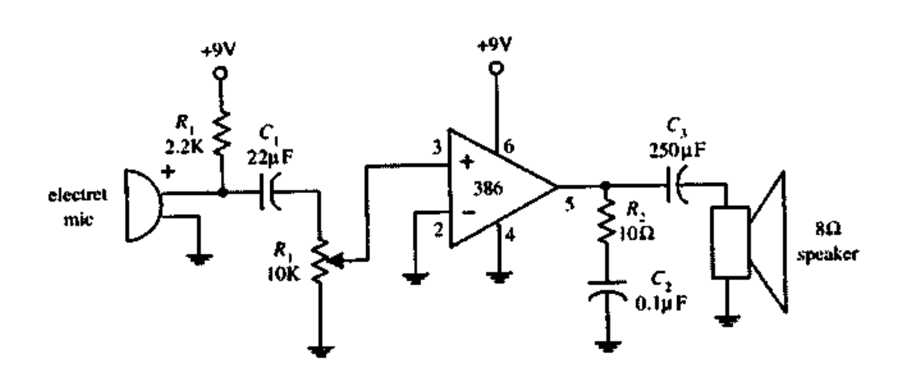
يبيِّن الشكل (18.11) ثلاث دارات رنانات وهي دارة (Buzzer Volume Control) وفيها يتم التحكم بشدة صوت الرنان بواسطة مقسِّم جهد R، ودارتا رنانات تُفعَّل بواسطة إشارات رقمية. في الدارة الموجودة في الوسط يوضع الرنان بين الباعث والأرض وعندما يكون الدخل (high) ينتقل الرنان إلى حالة (on) رنين، أما في الدارة الأخيرة فيوصل الرنان بين الباعث والمجمع، وعندما يكون الدخل (Low) يكون الرنان في حالة (on).



الشكل (18.11): دارات رنانات بسيطة.

مكبر صوت

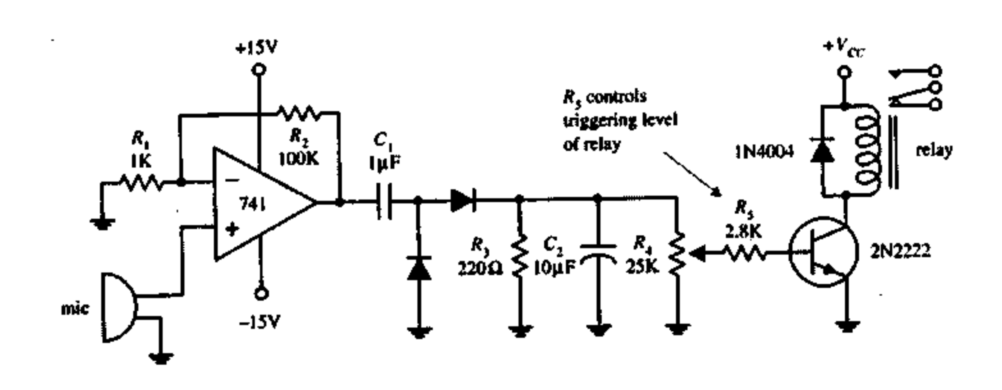
يتكون مكبر الصوت هذا من مضخم صوتي 386 وسماعة 8 Ω موصولة مع خرجه أما دخل المضخم 386 فيأتي من ميكرفون إليكتريت.



الشكل (19.11): مكبر صوت

مفتاح يُفعَّل صوتيا

يتكون هذا المفتاح من ميكروفون (mic) يلتقط الإشارات الصوتية ويحولها إلى إشارات كهربائية، ويتم تكبير الإشارات الصوتية بدارة مضخم عملياتي (741) غير عاكس ربحه يساوي $\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right) = (1+100) = (0^1)$. تُطبق إشارة خرج المضخم على مقوِّم يتكون من ديود ومقاومة R_3 ومكثف C_2 ومقاومة R_4. يعمل C_2 على تنعيم جهد الخرج المقوَّم والاقتراب به من الجهد المستمر، أما الديود الموصول مباشرة بين الطرف اليميني للمكثف (C_1) والأرض فيمرر الجزء السالب من الإشارات الصوتية إلى الأرض. يُضبط الجهد المستمر المطبق على قاعدة الترانزستور (2N2222) بواسطة مقاومة متغيرة (R_4) وتعمل (R_5) على حماية الترانزستور من التيارات الزائدة. عندما يكون مستوى الجهد المطبق على القاعدة كافياً ينتقل الترانزستور إلى حالة (on) وتُفعَّل الحاكمة.



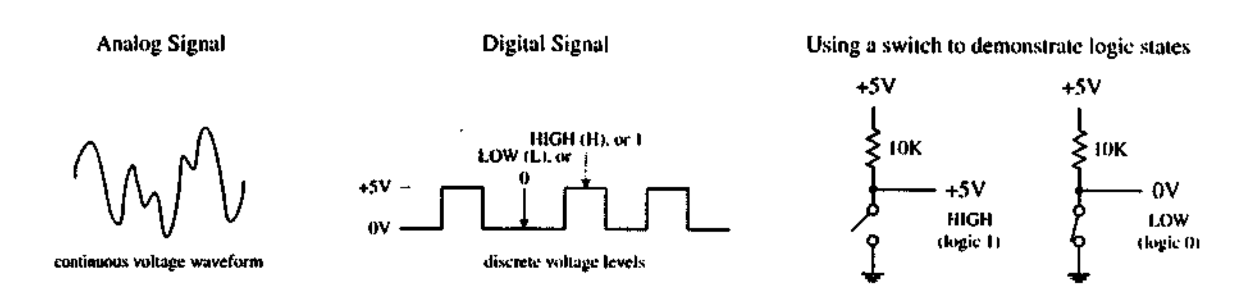
الشكل (20.11): مفتاح يُفعَّل صوتياً.



12 الإلكترونيات الرقمية

1.12 أسس الإلكترونيات الرقمية

تمت حتى الآن تغطية كل ما يتعلق بمجال الإلكترونيات التشابهية (analog electronics) ـــ الدارات التي تقبل وتستجيب للجهود المتغيرة باستمرار ضمن مجال محدد. وقد وجدنا أن الدارات التشابهية يمكن أن تتكون من مقومات، ومرشحات، ومضخمات، ومؤقتات RC بسيطة، وهزازات، ومفاتيح ترانزستورية بسيطة، وغيرها. ومع أن كل واحدة من تلك الدارات مهمة بذاتها، إلا أن كل تلك الدارات تعاني من نقص هام جداً وهو عدم قدرتها على تخزين ومعالجة خانات (bits) المعلومات (information) اللازمة لاتخاذ قرارات منطقية معقدة، ولإضافة إمكانية اتخاذ قرار منطقي إلى دارة ما يجب استخدام الإلكترونيات الرقمية.



الشكل (1.12): إشارة تشابهية، إشارة رقمية، استخدام المفاتيح لعرض الحالات المنطقيّة.

1.1.12 الحالات المنطقية الرقمية

توجد في الإلكترونيات الرقميَّة فقط حالتان للجهد في أية نقطة ضمن الدارة. وحالات الجهد هي إما high (عال) أو Low (منخفض)، ومعنى الجهد العالي أو المنخفض في موقع معيَّن من الدارة يمكن أن يدل على عدد من الأشياء، فيمكّن أن يمثل ذلك حالة مفتاح (on) أو (off) أو ترانزستور مشبع (saturated transistor)، كما يمكن أن يمثل خانة واحدة (one bit) من رقم أو فيما إذا كان حدث ما قد وقع أو فيما إذا كان من الواجب القيام بفعل ما. يمكن التعبير عن حالة high أيضاً بمصطلح (true) صحيح، وحالة (Low) بمصطلح (false) خاطئ ولكن هذا ليس دوماً مفروضاً عليك، ويمكنك اعتبار الأمور معكوسة كأن تعتبر high بمثابة خاطئ واعتبار Low بمثابة صحيح (true)، والقرار باستخدام أحد الخيارين عائد للمصمم، وفي اللغة الرقمية ولتجنب التضارب فيما يجب استخدامه من الخيارات بخصوص دلالات high وLow يستخدم

مصطلح positive true logic أي المنطق الصحيح الموجب، وفي هذا المنطق يعتبر (high = true)، أي المستوى high يقابل صح، أما المصطلح negative true logic أو المنطق الصحيح السالب فيستخدم عند اعتماد high = false، أي المستوى العالي يقابل خطأ.

تستخدم الرموز (1) و(0) في المنطق البولياني (Bolean Logic) لتمثيل حالات (true) و(false) على الترتيب أي:

true = 1
false = 0

إنّ الرموز (1) و(0) تستخدم في الإلكترونيات لتمثيل حالات الجهود high وLow حيث:

high = 1
Low = 0

وكما تلاحظ فإن الأمور قد تتعارض وخاصة إذا كنت لا تعرف بالتأكيد نوع المنطق الاصطلاحي المستخدم، هل هو المنطق الموجب الصحيح (Positive True) أو المنطق السالب الصحيح negative = true، وسوف نعطي بعض الأمثلة التي توضح التعارض في هذه المسألة.

تتعلق قيمة الجهد الذي يمثل حالة high أو Low بالدارة التكاملية الرقمية المستخدمة، (فكما ستلاحظ لاحقاً ترتكز كل العناصر الرقمية على دارات متكاملة، وكقاعدة عامة يعتبر الجهد (+5 V) بمثابة (high) والجهد (0 V) بمثابة (Low)، ولكن سنرى في الفقرة (4.12) أن هذا الاعتبار ليس صحيحاً بشكلٍ دائم فبعض الدارات المتكاملة (ICs) تعتبر مجال الجهد (+ 2.4 V حتى +5 V) بمثابة (high) والجهد من (0 V- حتى 0.8 V) بمثابة (Low). توجد دارات متكاملة من أنواع أخرى تعتمد مستويات أخرى للجهود بمثابة (high) و(Low). وسوف نعود إلى هذا الموضوع لاحقاً.

2.1.12 شيفرات الأعداد المستخدمة في الإلكترونيات الرقميّة

نظام الأعداد الثنائي

بما أن الدارات الرقمية تتعامل فقط مع حالتين للجهد، فمن المنطقي استخدام نظام العد الثنائي (binary system) لتعقب المعلومات. يتكون نظام العد الثنائي من رقمين ثنائيين هما (0) والـ (1) وتسمى بتات (bits)، فمثلاً 0 = Low و high = 1. يمكن تمثيل الرقم العشري (736) كما يلي:

$$736_{10} = 7 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 6 \times 10^0$$

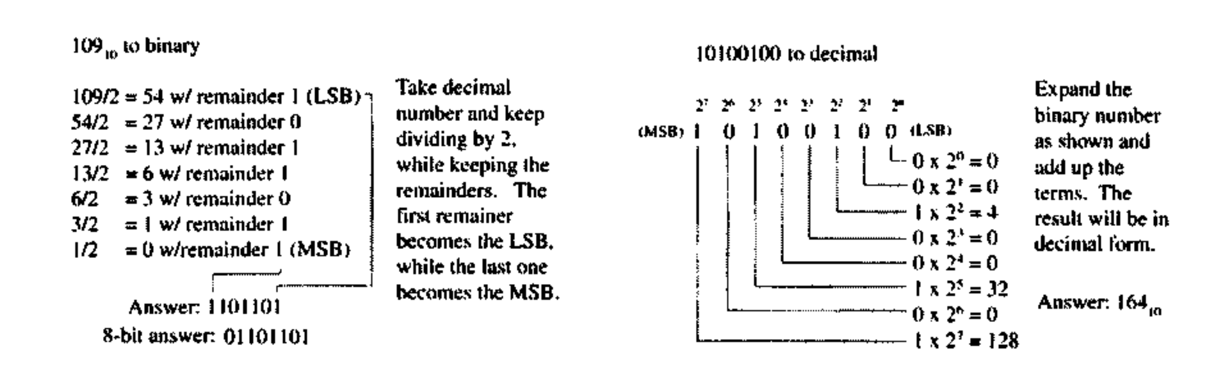
وكما نلاحظ فإن الرقم يمثل كمجموع حدود مكونة من قوى متعاقبة للرقم (10)، وبشكل مشابه يمكن تمثيل الرقم الثنائي (28_{10}) 11100 كما يلي:

$$11100_2 = 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 0 \times 2^1 + 0 \times 2^0$$

والدليل الذي يكتب إلى يمين الرقم والأسفل قليلاً يدل على نظام العد المستخدم فمثلاً (X_{10}) تدل على نظام الأعداد العشري و(X_2) تدل على نظام العد الثنائي. تسمى الخانة الموجودة إلى يسار العدد (2) المرفوع إلى أعظم قوة باسم الخانة الأكثر أهمية most significant bit ويرمز لها بالرمز (MSB)، أما الخانة ذات أدنى قوة فتسمى الخانة الأقل أهمية (Least Significant bit) ويرمز لها اختصاراً (LSB). ونبيِّن فيما يلي الطرق المستخدمة للتحويل من النظام الثنائي إلى العشري وبالعكس.

من الجدير بالذكر هنا أنّ أغلب النظم الرقمية تتعامل مع سلاسل بطول 4، أو 8، أو 16 أو 32 خانة. في أمثلة التحويل من عشري إلى ثنائي المعطاة في الشكل (2.12) حصلت على جواب مكون (7) خانات (7 bit).

وفي نظام 8 bit عليك إضافة صفر إلى يسار خانة الـ (MSB) فيصبح الجواب (01101110) وفي نظام 16 bit يجب إضافة (9) أصفار على يسار خانة MSB ليصبح الجواب (0000000001101101).



الشكل (2.12): طرق التحويل من الثنائي إلى العشري وبالعكس.

> **ملاحظة عملية**
>
> يمكن تحويل رقم من نظام أعداد إلى نظام آخر باستخدام الآلة الحاسبة، فمثلاً لتحويل رقم من النظام العشري إلى النظام الثنائي، اكتب الرقم على الشاشة وقبل ذلك يجب اختيار نظام الأعداد العشري (decimal) ثم اضغط على زر نظام الأعداد الثنائي فيتحول الرقم مباشرة إلى النظام الثنائي. أما لتحويل عدد من النظام الثنائي إلى العشري، اختر نظام الأعداد الثنائي (binary mode) واكتب الرقم (واحدات وأصفار) ثم انتقل إلى النظام العشري (decimal mode).

أنظمة الأعداد الثمانية والستة عشرية

تستخدم في الإلكترونيات الرقمية أنظمة عَد أخرى غير النظام الثنائي وهي نظام العد الثماني (أساسه العدد 8) وتستخدم فيه فقط ثمانية أعداد هي 0، 1، 2، 3، 4، 5، 6 و7 ونظام العد الستة عشري (Hexadecimal) وأساسه العدد (16) ويسمح فيه باستخدام ستة عشر عدداً هي 0، 1، 2، 3، 4، 5، 6، 7، 8، 9، A، B، C، D، E وF. وفيما يلي أمثلة على بعض الأرقام في النظام الثماني والستة عشري وتحويلها إلى الرقم العشري المكافئ

$247_8 = 2 \times 8^2 + 4 \times 8^1 + 7 \times 8^0 = 167_{10}$ (عشري)

$2D5_{16}$ (ستة عشري) $= 2 \times 16^2 + D(=13_{10}) \times 16^1 + 9 \times 16^0 = 725_{10}$

يعتبر نظام العد الثنائي الخيار الطبيعي المستخدم في النظم الرقمية، ولكن ولأن الأعداد الثنائية تصبح طويلة ويصعب تفسيرها في عقولنا، فإن الأعداد يمكن أن تكتب في النظام الثماني أو الستة عشري. يمكن التحويل بسهولة من نظام العد الثماني والستة عشري إلى الثنائي وبالعكس وذلك لأن الرقم الثنائي مهما كان طويلاً يقسم إلى مجموعات من البتات، كل مجموعة مكونة من ثلاث خانات عند التحويل من الثنائي إلى الثماني وإلى مجموعات مكونة من (4) خانات عند التحويل إلى النظام الستة عشري وببساطة تُضاف أصفار على يسار خانة الـ MSB كي يصبح عدد خانات الرقم قابلاً للقسمة على (3) عند التحويل إلى الثماني وعلى (4) عند الرغبة في التحويل إلى الستة عشري والشكل (3.12) يشرح ذلك.

إن نظام العد الستة عشري قد حل هذه الأيام محل نظام العد الثماني، وقد كان النظام الثماني شائع الاستخدام عندما كانت نظم المعالجات الصغرية تستخدم كلمات بطول (6-bit)، وكل ذلك قابل للقسمة على وحدات بطول 3 bit (عدد ثماني واحد). أما هذه الأيام فتعمل المعالجات الصغرية (Microprocessors) بشكلٍ أساسي بكلمات طولها (8-bit)، (16-bit)، (20-bit)، (32-bit) أو (64-bit)، وكل هذه الكلمات قابلة للقسمة على وحدات بطول (4 bit) (رقم ستة عشري واحد (1 hex digit)، ومعنى ذلك أنّ كلمة بطول 8-bit يمكن أن تقسم إلى رقمين (2 hex digits) في النظام الستة عشري وكلمة بطول (16-bit) يمكن أن تقسم إلى أربعة أرقام و(20-bit) إلى (5) أرقام وهكذا. إن الترميز الستة عشري

للأعداد يظهر في العديد من تطبيقات المعالجات والذواكر التي تستخدم شيفرات البرمجة (ضمن لغة التجميع (assembly) على سبيل المثال) لعنونة المواقع الذاكرية وإطلاق عمل مهام مخصصة، والتي كانت ــ لولا النظام الستة عشري ــ سوف تحتاج إلى الكتابة بأعداد ثنائية طويلة. يمكن مثلاً استبدال شيفرة عنوان طولها 20-bit لتمييز موقع ذاكري من مليون موقع بشيفرة وفق النظام الستة عشري في برنامج لغة التجميع (assembly)

Octal to Binary

537_8 to binary

5 3 7 → 101 010 111

Answer: 101010111_2

Binary to Octal

$111\ 001\ 100_2$ to octal

111 001 100 → 7 1 4

Answer: 714_8

Hex to Binary

$3E9_{16}$ to binary

3 E 9 → 0011 1110 1001

Answer: $0011\ 1110\ 1001_2$

Binary to Hex

$1001\ 1111\ 1010\ 0111_2$ to octal

1001 1111 1010 0111 → 9 F A 7

Answer: $9FA7_{16}$

الشكل (3.12): التحويل من ثماني إلى عشري وبالعكس ومن ستة عشري إلى عشري وبالعكس.

فينخفض طول الشيفرة إلى خمسة أرقام (في النظام الستة عشري). يقوم برنامج المترجم (compiler program) فيما بعد بتحويل الأعداد الستة عشرية في برنامج لغة التجميع (assembly) إلى أعداد ثنائية (شيفرة الآلة) يستطيع المعالج الصغري استخدامها. يبيِّن الجدول (1.12) التحويل بين أنظمة العد.

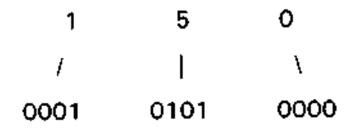
الجدول (1.12): جدول التحويل بين نظم العد العشري، الثنائي، الثماني، والستة عشري ونظام الـ BCD.

النظام العشري (Decimal)	النظام الثنائي (Binary)	النظام الثماني (Octal)	النظام الستة عشري (Hexadecimal)	النظام العشري المرمز ثنائياً (BCD)
00	0000 0000	00	00	0000 0000
01	0000 0001	01	01	0000 0001
02	0000 0010	02	02	0000 0010
03	0000 0011	03	03	0000 0011
04	0000 0100	04	04	0000 0100
05	0000 0101	05	05	0000 0101
06	0000 0110	06	06	0000 0110
07	0000 0111	07	07	0000 0111
08	0000 1000	10	08	0000 1000
09	0000 1001	11	09	0000 1001
10	0000 1010	12	0A	0001 0000
11	0000 1011	13	0B	0001 0001
12	0000 1100	14	0C	0001 0010
13	0000 1101	15	0D	0001 0011
14	0000 1110	16	0E	0001 0100
15	0000 1111	17	0F	0001 0101
16	0001 0000	20	10	0001 0110
17	0001 0001	21	11	0001 0111
18	0001 0010	22	12	0001 1000

النظام العشري (Decimal)	النظام الثنائي (Binary)	النظام الثماني (Octal)	النظام الستة عشري (Hexadecimal)	النظام العشري المرمز ثنائياً (BCD)
19	0001 0011	23	13	0001 1001
20	0001 0100	24	14	0010 0000

شيفرة الـ BCD

تستخدم في النظام العشري المرمَّز ثنائياً أربع خانات ثنائية لتمثيل كل رقم في العدد العشري، فالرقم (150) في النظام العشري يُعبَّر عنه في نظام الـــ BCD كما يلي:



150_{10} = (0001 0101 0000) BCD

إن عملية التحويل من نظام الـــ BCD إلى النظام الثنائي صعبة نسبيّاً، كما في الشكل (4.12)، ولكن وللتخلص من طريقة التحويل هذه يمكنك التحويل أولاً من نظام الـــ BCD إلى النظام العشري ثم التحويل من العشري إلى الثنائي، ولكن ذلك لا يوضح لك كيف تتعامل الآلة مع الواحدات والأصفار، ومن النادر أن تحتاج إلى تحويل من نظام الـــ BCD إلى النظام الثنائي، ولذلك لن نسهب في هذه الفكرة ونتركها لك لتفهمها من خلال الشكل (4.12).

3-digit BCD

MSD — Second digit — LSD

l k j i — h g f e — d c b a

6 3 (decimal) 0110 0011 (BCD) → 0001, 0010, 10100, 101000 → 111111 (binary)

8 2 3: 1000 0010 0011 → 0001, 0010, 10100, 1100100000 → 1100110111

bit position	Weighting factor decimal	Weighting factor binary
a	1	1
b	2	10
c	4	100
d	8	1000
e	10	1010
f	20	10100
g	40	101000
h	80	1010000
i	100	1100100
j	200	11001000
k	400	110010000
l	800	1100100000

الشكل (4.12): التحويل من BCD إلى ثنائي.

يستخدم نظام الـــ BCD عند إظهار الأرقام من (0) وحتى (9)، كما في الساعات الرقمية وأجهزة القياس (multimeters). سوف نناقش نظام الـــ BCD لاحقاً في الفقرة (3.12).

الإشارة، القيمة والمتمم الثاني للأعداد

لم نتعرض حتى للأعداد الثنائية السالبة. كيف نمثل الأعداد الثنائية السالبة؟

تعتمد الطريقة البسيطة في تمثيل الأعداد الثنائية السالبة على استخدام الإشارة (sign) والقيمة (magnitude)، وفي هذا التمثيل تحجز خانة، غالباً خانة MSB، كخانة إشارة (sign bit). إذا كانت خانة الإشارة (0) يكون الرقم موجباً، وإذا

كانت (1) يكون الرقم سالباً (انظر الشكل 5.12). ومع أن التمثيل كإشارة وقيمة بسيط إلا أنه نادر الاستخدام وذلك لأن إنجاز عملية الجمع يتطلب إجراءات مخالفة لما تحتاجه عملية الطرح (كما سنرى في الفقرة التالية). وعادة ترى الأعداد الممثلة كإشارة وقيمة على وحدات الإظهار وفي تطبيقات التحويل من تشابهي إلى رقمي، ولكن نادراً ما تراها في الدارات التي تنجز العمليات الحسابيَّة.

هناك خيار أكثر شيوعاً من التمثيل كإشارة وقيمة ويستخدم عند التعامل مع الأعداد السالبة وهذا الخيار هو المتمم الثاني، وفي المتمم الثاني تكون الأعداد الموجبة تماماً كالأعداد عديمة الإشارة، أما العدد السالب فيمثل كعدد ثنائي إذا أُضيف إلى العدد الموجب المتعلق به كان الناتج صفراً.

وبهذه الطريقة يمكن تجنب استخدام إجراءات مختلفة لعمليات الجمع والطرح.

وسترى كيفية تحقيق ذلك في الفصل التالي.

DECIMAL	SIGN-MAGNITUDE	2'S COMPLEMENT
+7	0000 0111	0000 0111
+6	0000 0110	0000 0110
+5	0000 0101	0000 0101
+4	0000 0100	0000 0100
+3	0000 0011	0000 0011
+2	0000 0010	0000 0010
+1	0000 0001	0000 0001
0	0000 0000	0000 0000
-1	1000 0001	1111 1111
-2	1000 0010	1111 1110
-3	1000 0011	1111 1101
-4	1000 0100	1111 1100
-5	1000 0101	1111 1011
-6	1000 0110	1111 1010
-7	1000 0111	1111 1001
-8	1000 1000	1111 1000

الشكل (5.12): جدول تحويل من النظام العشري إلى نظام ثنائي ممثل كإشارة وقيمة وإلى المتمم الثنائي.

العمليات الحسابية على الأعداد الثنائية

يمكن إجراء كافة العمليات الحسابية (الجمع adding، والطرح subtracting، والضرب multiplying والقسمة dividing) على الأعداد في كافة الأنظمة بواسطة الآلة الحاسبة بعد اختيار نظام الأعداد المناسب، ولكن ذلك يعتبر بمثابة هروب من تعلّم كيفية إنجاز العمليات الحسابيَّة. إنَّ فهم آلية إنجاز العمليات الحسابية مهم جداً عند تصميم الدارات الحسابية الفعليَّة. سنبيِّن الآن طرق إنجاز عمليات الجمع والطرح.

الجمع

إن جمع الأعداد الثنائية مثل جمع الأعداد العشريَّة وعندما يكون حاصل جمع العمود الواحد أكبر من الرقم (1) فإننا نضع 0 في ناتج العملية ونحمل (1) إلى العمود الثاني (الشكل 6.12).

$$\begin{array}{rcrrrr} & & 1 & 1 & 1 & \\ & 5_{10} = & 0 & 1 & 0 & 1 \\ + & 3_{10} = & 0 & 0 & 1 & 1 \\ \hline & & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \qquad \begin{array}{rrl} & 20_{10} = & 00010100 \\ + & 87_{10} = & 01010111 \\ \hline & & 01101011 \end{array}$$

الشكل (6.12): الجمع في النظام الثنائي.

الطرح

إن طرح الأعداد الثنائية ليس سهلاً كما يبدو، وهو يشبه الطرح في النظام العشري ولكنه قد يكون مربكاً، فمثلاً عندما ترغب بطرح (1) من (0) عليك استعارة 1 من العمود المجاور! أي عليك استعارة لتشكيل (2_{10}) أو 10 في الثنائي، وذلك قد يكون غير مريح، لذلك يفضل استخدام المتمم الثنائي، الذي يؤمن خانة الإشارة ثم إجراء جمع كما في الشكل (7.12) اليميني. تستخدم هذه الطريقة في الدارات الرقمية لأنها تسمح بالجمع والطرح دون حدوث أية إشكالات عدد طرح عدد كبير من عدد صغير.

$$\begin{array}{r} 4_{10} \\ -\,1_{10} \\ \hline 3_{10} \end{array} \qquad \begin{array}{rrrrr} & & & 1 & \\ & & 0 & 10\rightarrow & 10 \\ & 0 & \not{1} & \not{0} & \not{0} \\ - & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \qquad \begin{array}{rl} +19_{10} = & 00010011 \\ -7_{10} = & 11111001 \\ \hline \text{Sum} = & 00001100 \end{array}$$

الشكل (7.12): الطرح في النظام الثنائي.

الشيفرة المعيارية الأمريكية لتبادل المعلومات ASCII

الـ ASCII هي الشيفرة المعيارية الأمريكية لتبادل المعطيات (American Standard Code for Information Interchange)، وهي عبارة عن شيفرة حرفية عددية (alphanumeric) تستخدم لإرسال الحروف (letters)، والرموز (symbols) والأعداد (numbers) ومحارف أُخرى خاصة بين الحواسيب (computer peripherals)، كالطابعات ولوحات المفاتيح وغيرها. تتكون شيفرة الـ ASCII من 128 رمزاً مختلفاً كل واحد منها 7 bit. تُحجز الرموز من (0000 0000) أو (00 في النظام الستة عشري) إلى (1111 0011 أو F 1 في النظام الستة عشري) للمحارف غير المطبوعة، أو لأوامر الآلة الخاصة مثل ESC (escape)، DEL (delete)، CR (carriage return عودة العربة)، LF (line feed) وغيرها، أما الرموز من (0100 0000) أو من (20 في نظام hex) إلى (1111 1111) أو (7F في نظام الـ hex) فتحجز للمحارف المطبوعة مثل a، A، #، &، }، @، 3 وغيرها. انظر الجداول (2.12) و(3.12).

عند إرسال رمز (ASCII) تُضاف إليه خانة ليصبح متآلفاً مع نظم الـ (8-bit) وعادة تكون هذه الخانة (0) وتهمل، أو يمكن أن تستخدم كخانة تكافؤ (parity bit) من أجل كشف الخطأ. سوف نغطي خانات التكافؤ في الفقرة (12-3)، ويمكن للخانة الإضافية أن تكون خانة ذات وظيفة خاصة لتحقيق مجموعة إضافية من المحارف المخصصة (specialized characters).

الجدول (2.12): محارف الـ ASCII غير الطباعية

DEC	HEX	7-BIT CODE	CONTROL CHAR	CHAR	MEANING
00	00	000 0000	Ctrl-@	NUL	Null
01	01	000 0001	Ctrl-A	SOH	Start of heading
02	02	000 0010	Ctrl-B	STX	Start of text
03	03	000 0011	Ctrl-C	ETX	End of text
04	04	000 0100	Ctrl-D	EOT	End of xmit
05	05	000 0101	Ctrl-E	ENQ	Enquirty
06	06	000 0110	Ctrl-F	ACK	Acknowledge
07	07	000 0111	Ctrl-G	BEL	Bell
08	08	000 1000	Ctrl-H	BS	Backspsce
09	09	000 1001	Ctrl-I	HT	Horizontal tab
10	0A	000 1010	Ctrl-J	LF	Line feed
11	0B	000 1011	Ctrl-K	VT	Vertical tab
12	0C	000 1100	Ctrl-L	FF	Form feed
13	0D	000 1101	Ctrl-M	CR	Carriage return
14	0E	000 1110	Ctrl-N	SO	Shift out
15	0F	000 1111	Ctrl-O	SI	Shift in
16	10	001 0000	Ctrl-P	DLE	Data line escape
17	11	001 0001	Ctrl-Q	DC1	Device control 1
18	12	001 0010	Ctrl-R	DC2	Device control 2
19	13	001 0011	Ctrl-S	DC3	Device control 3
20	14	001 0100	Ctrl-T	DC4	Device control 4
21	15	001 0101	Ctrl-U	NAK	Neg acknowledge
22	16	001 0110	Ctrl-V	SYN	Sunchronous idle
23	17	001 0111	Ctrl-W	ETB	End of xmit block
24	18	001 1000	Ctrl-X	CAN	Cancel
25	19	001 1001	Ctrl-Y	EM	End of medium
26	1A	001 1010	Ctrl-Z	SUB	Substitute
27	1B	001 1011	Ctrl-[	ESC	Escape
28	1C	001 1100	Ctrl-\	FS	File separator
29	1D	001 1101	Ctrl-]	GS	Group separator
30	1E	001 1110	Ctrl-^	RS	Record separtor
31	1F	001 1111	Ctrl-_	US	Unit separtor

الجدول (3.12): محارف ASCII الطباعية.

DEC	HEX	7-BIT CODE	CHAR	DEC	HEX	7-BIT CODE	CHAR
32	20	010 0000	SP	80	50	101 0000	P
33	21	010 0001	!	81	51	101 0001	Q
34	22	010 0010	"	82	52	101 0010	R
35	23	010 0011	#	83	53	101 0011	S
36	24	010 0100	$	84	54	101 0100	T
37	25	010 0101	%	85	55	101 0101	U
38	26	010 0110	&	86	56	101 0110	V
39	27	010 0111	'	87	57	101 0111	W
40	28	010 1000	(	88	58	101 1000	X
41	29	010 1001	)	89	59	101 1001	Y
42	2A	010 1010	*	90	5A	101 1010	Z
43	2B	010 1011	+	91	5B	101 1011	[

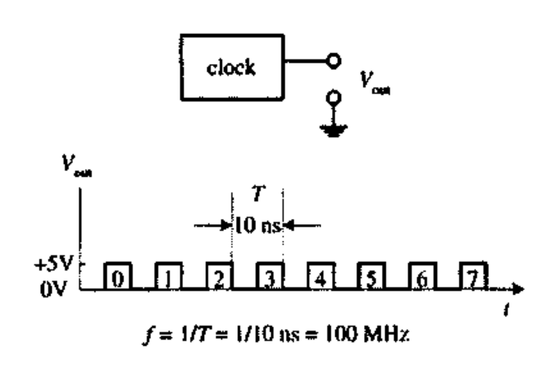
DEC	HEX	7-BIT CODE	CHAR	DEC	HEX	7-BIT CODE	CHAR
44	2C	010 1100	,	92	5C	101 1100	\
45	2D	010 1101	-	93	5D	101 1101	]
46	2E	010 1110	.	94	5E	101 1110	^
47	2F	010 1111	/	95	5F	101 1111	_
48	30	011 0000	0	96	60	110 0000	`
49	31	011 0001	1	97	61	110 0001	a
50	32	011 0010	2	98	62	110 0010	b
51	33	011 0011	3	99	63	110 0011	c
52	34	011 0100	4	100	64	110 0100	d
53	35	011 0101	5	101	65	110 0101	e
54	36	011 0110	6	102	66	110 0110	f
55	37	011 0111	7	103	67	110 0111	g
56	38	011 1000	8	104	68	110 1000	h
57	39	011 1001	9	105	69	110 1001	i
58	3A	011 1010	:	106	6A	110 1010	j
59	3B	011 1011	;	107	6B	110 1011	k
60	3C	011 1100	<	108	6C	110 1100	l
61	3D	011 1101	=	109	6D	110 1101	m
62	3E	011 1110	>	110	6E	110 1110	n
63	3F	011 1111	?	111	6F	110 1111	o
64	40	100 0000	@	112	70	111 0000	p
65	41	100 0001	A	113	71	111 0001	q
66	42	100 0010	B	114	72	111 0010	r
67	43	100 0011	C	115	73	111 0011	s
68	44	100 0100	D	116	74	111 0100	t
69	45	100 0101	E	117	75	111 0101	u
70	46	100 0110	F	118	76	111 0110	v
71	47	100 0111	G	119	77	111 0111	w
72	48	100 1000	H	120	78	111 1000	x
73	49	100 1001	I	121	79	111 1001	y
74	4A	100 1010	J	122	7A	111 1010	z
75	4B	100 1011	K	123	7B	111 1011	{
76	4C	100 1100	L	124	7C	111 1100	|
77	4D	100 1101	M	125	7D	111 1101	}
78	4E	100 1110	N	126	7E	111 1110	~
79	4F	100 1111	O	127	7F	111 1111	DEL

3.1.12 التوقيت بنبضات الساعة والنقل التفرعي والتسلسلي

قبل الانتقال إلى الفقرة التالية سنأخذ هنا فكرة مختصرة عن ثلاثة أشياء هامة وهي التوقيت بنبضات clock والنقل التفرعي، والنقل التسلسلي.

التوقيت بنبضات clock

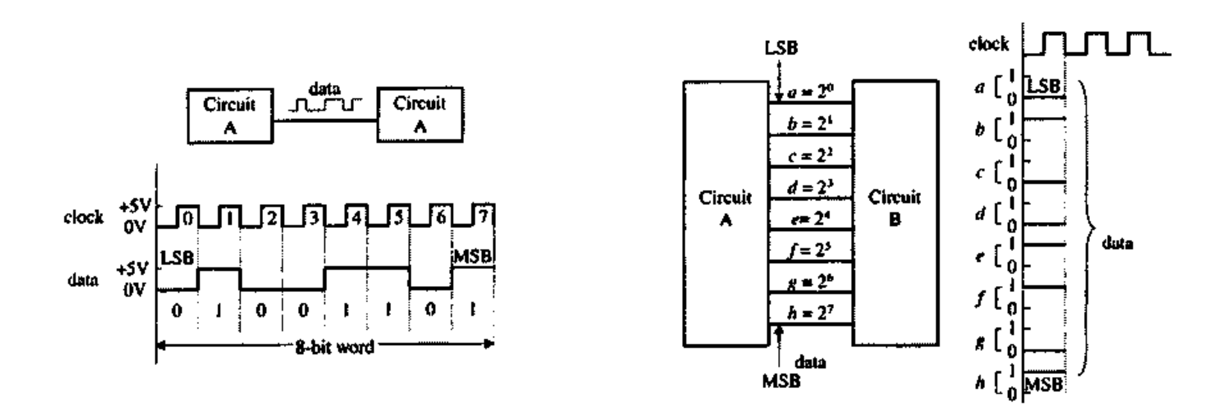
تحتاج الدارات الرقمية إلى توقيت دقيق كي تعمل بشكلٍ مناسب، وعادة تستخدم دارة توليد سلسلة من النبضات التي تأخذ حالة high وLow بتردد ثابت وتستخدم هذه النبضات كمرجع ويتم تفعيل وتشغيل كافة الدارات في المنظومة اعتماداً على هذا المرجع. تستخدم نبضات clock (نبضات الساعة أو نبضات التوقيت) لدفع بتات المعطيات (bits of Data) عبر الدارة الرقميَّة. العلاقة بين دور نبضات clock وتردد النبضات هي ($T = 1/f$)، فإذا كان $T = 10\ ns$ مثلاً يكون $f = \frac{1}{10ns} = 100MHz$.



الشكل (8.12): شكل نبضات التوقيت.

التمثيل التسلسلي والتفرعي

يمكن نقل المعلومات الثنائية من موقع إلى آخر باستخدام الطريقة التسلسليَّة أو التفرعية. تستخدم الصيغة التسلسلية في النقل عند توفر ناقلٍ كهربائي واحد (وخط، أرضي مشترك) لنقل المعطيات. وتحتل كل خانة من العدد الثنائي دور نبضة clock، ويحدث التغيُّر من خانة إلى أخرى مع الحافة الصاعدة أو الهابطة (الجبهة الصاعدة، أو الهابطة) لنبضة Clock ويتعلق نوع الحافة (الجبهة) التي يحدث عندها التغيُّر بالدارة المستخدمة. يبيِّن الشكل (9.12) كلمة بطول 8 bit (8-bit word) تُرسل من دارة (A) إلى دارة (B) في زمن ثمانية نبضات Clock (نبضات clock ذوات الأرقام من (0) حتى (7) على الشكل 9.12). يستخدم النقل التسلسلي في النظم الحاسوبيَّة لنقل المعطيات بين لوحة المفاتيح والحاسوب، ولنقل المعطيات بين حاسوبين عبر خط هاتفي.



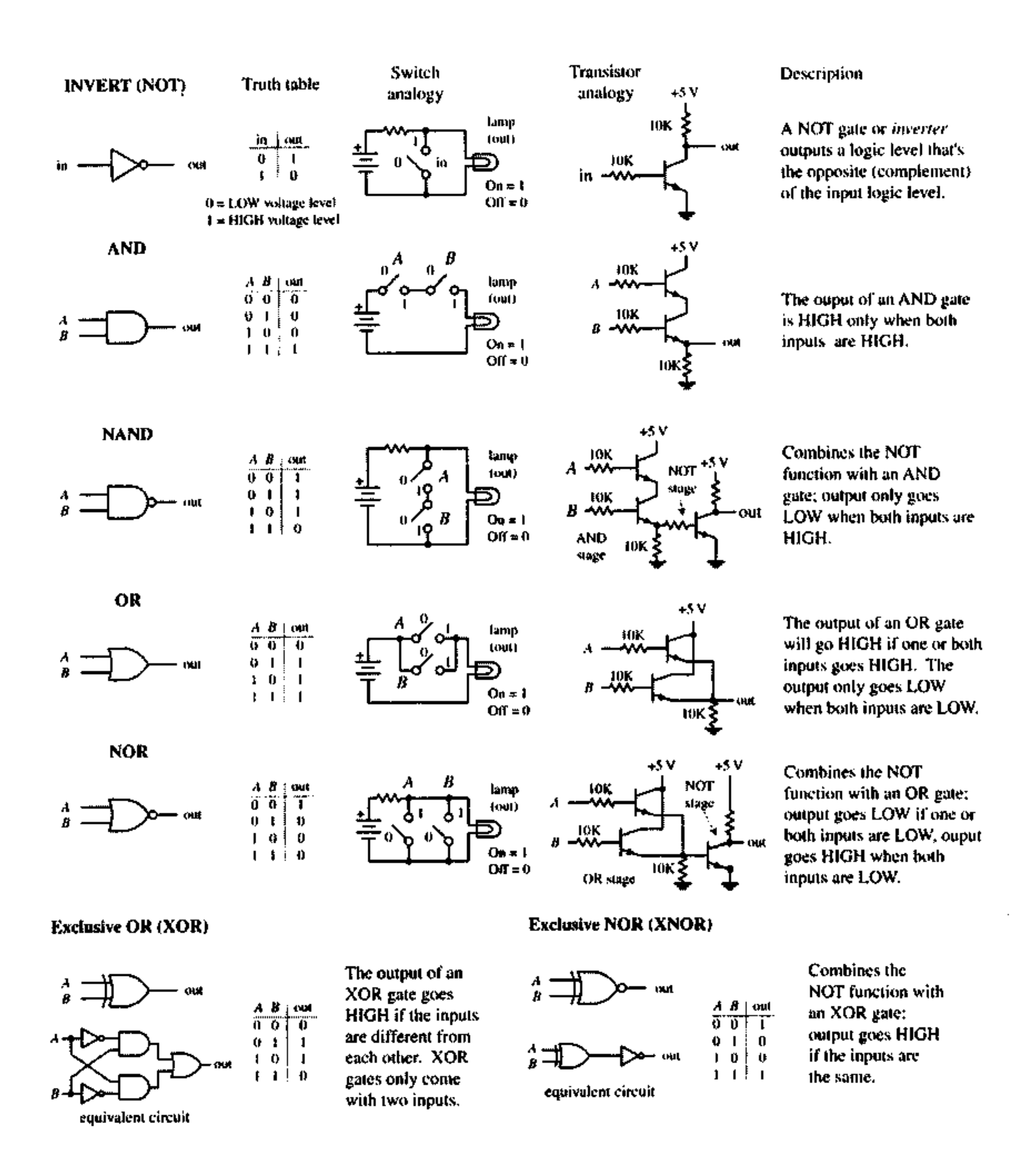
الشكل (9.12): النقل التسلسلي والتفرعي للمعلومات.

يستخدم ناقل كهربائي مستقل لكل خانة وأرضي مشترك في النقل التفرعي للمعلومات.

في الشكل (9.12) تُرسل سلسلة طولها 8-bit (01110110) من الدارة A إلى الدارة B، وكما تلاحظ من الشكل فإن عملية النقل تتم خلال دور نبضة clock واحدة، ولا تحتاج العملية إلى 8 نبضات clock لإتمامها، وهذا يعني أن النقل التفرعي أسرع من النقل التسلسلي بـــ (8) مرات. تستخدم طريقة النقل التفرعية ضمن منظومات المعالج (microprocessor) التي تستخدم ممرات (buses) متعددة الخطوط للمعطيات وللتحكم، لإرسال المعطيات وتعليمات التحكم من معالج إلى جهاز آخر يعمل مع المعالج (مثل ذاكرة memory، أو مسجلات خرج).

2.12 البوابات المنطقية

إن البوابات الرقمية هي مكونات البناء الأساسية للإلكترونيات الرقميَّة، والبوابات الرقميَّة الأساسيَّة هي بوابة العاكس NOT، بوابة AND، بوابة NAND، بوابة OR، وبوابة NOR وبوابات XOR وXNOR وتنجز كل واحدة من هذه البوابات عملية منطقية تختلف عن البوابات الأخرى يبيِّن الشكل (10.12) رموز البوابات وجداول الحقيقة (truth tables) والدارة الكهربائية المكونة من مفاتيح مكافئةً للبوابة إضافة إلى الدارة الترانزستورية ومن الجدول تلاحظ أن:



NOT:

in	out
0	1
1	0

AND:

A	B	out
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

NAND:

A	B	out
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

OR:

A	B	out
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

NOR:

A	B	out
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

XOR:

A	B	out
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

XNOR:

A	B	out
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

الشكل (10.12): رموز البوابات، جداول الحقيقية والدارات المكافئة.

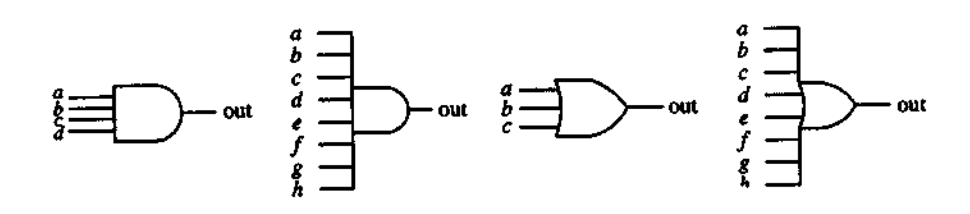
بوابة العاكس (NOT) تعطي خرجاً هو دوماً المعكوس المنطقي للدخل، أما بوابة AND فإن خرجها يكون (high) إذا كان المدخلان معاً high، في بوابة NAND يكون الخرج Low إذا كان المدخلان high وفي باقي الحالات يكون الخرج high. يكون الخرج High في بوابة OR إذا كان أحد المدخلين على الأقل في حالة high ولا يكون Low إلا إذا كان كلا المدخلين في حالة Low. يمكن تشكيل بوابة NOR بوصل خرج بوابة OR مع دخل بوابة NOT، ويكون خرج بوابة NOR في حالة Low إذا كان أحد المدخلين في حالة Low والآخر في حالة high وإذا كان كلا المدخلين في حالة Low، فإن الخرج يكون high.

يكون خرج بوابة XOR في حالة high إذا كانت الحالات المنطقية للمدخلين مختلفة، وLow إذا كانت الحالة المنطقية للمدخلين متماثلة. أما في بوابة XNOR فبالعكس، إذ يكون الخرج high إذا كان المدخلان بحالة منطقية متماثلة وLow إذا كانت الحالة المنطقية للمدخلين مختلفة.

1.2.12 البوابات المنطقية متعددة المداخل

تتوفر بوابات AND، NAND، OR وNOR بأكثر من مدخلين (ولا ينطبق ذلك على بوابات XOR وXNOR التي تكون دوماً بمدخلين).

يبيِّن الشكل (11.12) بوابة AND بأربعة مداخل وبوابة AND بثمانية مداخل وبوابات OR بثلاثة مداخل وبثمانية مداخل. في بوابة AND ذات الثمانية مداخل يجب أن تكون كافة المداخل في حالة high كي يكون الخرج high، أما في بوابة OR بثمانية مداخل فيكفي أن يكون أحد المداخل high كي يكون الخرج high.



الشكل (11.12): بوابات AND وOR متعددة المداخل.

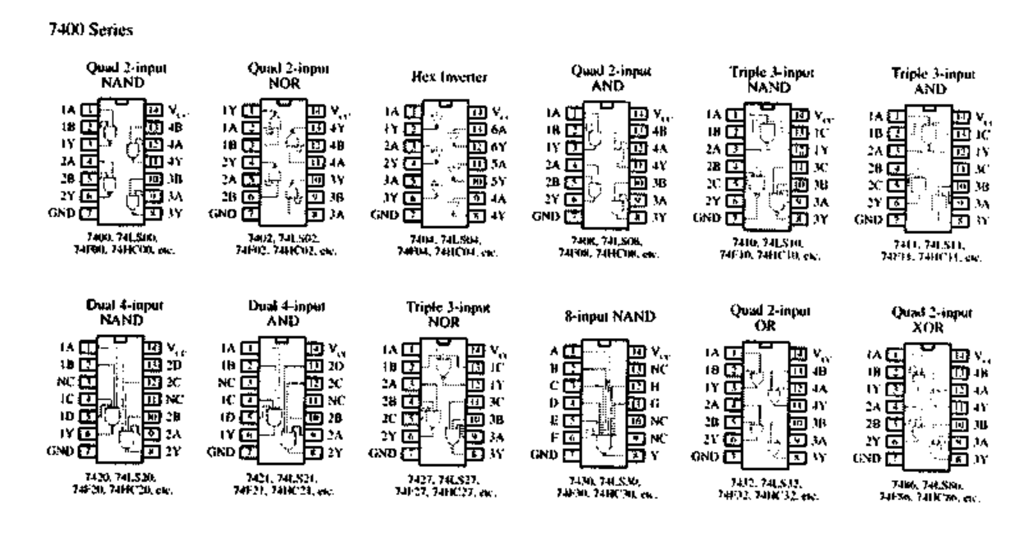
2.2.12 الدارات المتكاملة للبوابات المنطقية الرقمية

تُصمم البوابات المنطقية الرقميَّة من قبل الشركات الصانعة، ويعتبر تصميم البوابات باستخدام عناصر منفصلة (discrete components) غير عملي بالنسبة للأداء العام للبوابة (والمتضمن استهلاك الطاقة، والسرعة، وإمكانية القيادة ... إلخ) وكذلك بالنسبة للكلفة المادة والحجم. تستخدم تقنيات مختلفة في تصنيع البوابات المنطقية الرقمية والتقنيات الأكثر شيوعا هي تقنيات TTL (Transistor-Transistor Logic) وتقنية CMOS (Complementary MOSFET). تستخدم ترانزستورات ثنائية القطبية في تقنية الـــ TTL، أما في تقنية CMOS فتستخدم ترانزستورات MOSFET وكلتا التقنيتين تنجزان نفس الوظائف الأساسية. ولكن تختلفان عن بعض بالمميزات والخواص كالاختلاف باستهلاك الطاقة (power consumption)، والسرعة (speed) وإمكانية القيادة وغيرها.

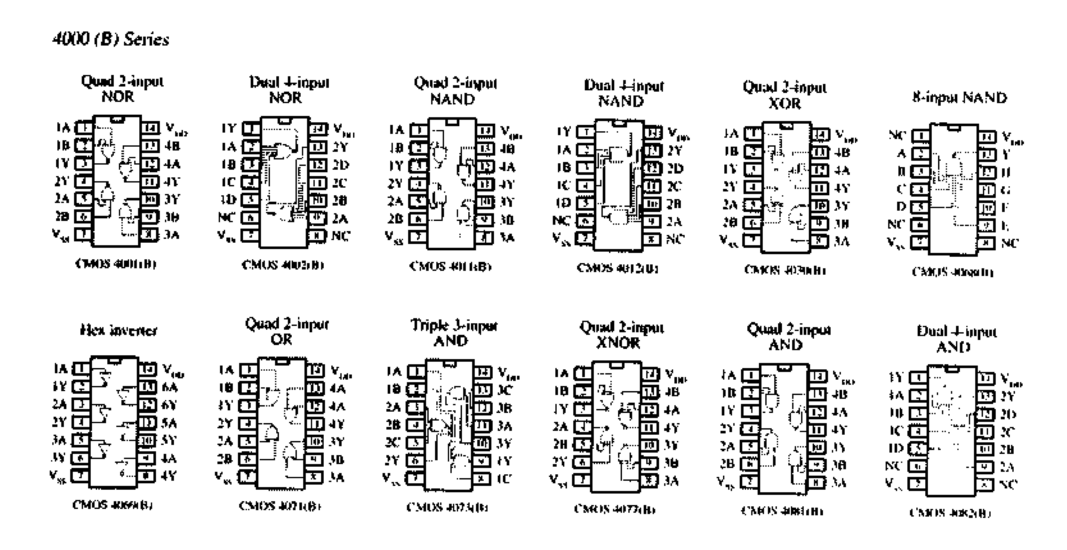
توجد عوائل فرعية متعددة في تقنيات TTL وCMOS. سوف تدرس العوائل الفرعية بالإضافة إلى المميزات المختلفة التي تخص كل واحدة منها بتفصيل أكثر في الفقرة (4.12).

تحوي الدارة التكاملية المنطقية، سواء كانت من عائلة TTL أو من عائلة CMOS على أكثر من بوابة واحدة (مثلاً أربع بوابات NAND ذات مدخلين، أو ست عواكس). تتشارك كافة البوابات الموجودة ضمن الدارة المتكاملة الواحدة بخطي

التغذية (رجل موجب التغذية Vcc+ أو VDD+) ورجل الأرضي (ground). تصمم أغلب الدارات المتكاملة في عوائل TTL وCMOS بحيث تغذى من (V 5+)، ولا ينطبق ذلك على كل العوائل الفرعية وسنوضح ذلك لاحقاً. نفترض أن المستويات المنطقية هي (V 0) للحالة Low و(V 5+) للحالة high ولكن هذه الجهود ليست بالضرورة قيمة واحدة وثابتة للجهد ففي عائلة 74xx على سبيل المثال يعتبر جهد الدخل high إذا كان واقعاً في المجال (2-5) فولت وLow إذا كان واقعاً في المجال (0-0.8) فولت ويعتبر جهد الخرج high إذا كان بين (V 2.4) و(V 5) وLow إذا تراوح بين (V 0) و 0.4 (V. أما في عائلة CMOS سلسلة 4000B التي تغذى من (V 5+) فيعتبر جهد الدخل high إذا كان بين V (5 - 3.3) وLow إذا كان V (1.7 ÷ 0)، أما الخرج فيعتبر high إذا كان بين V (5 - 4.9) وLow إذا كان واقعاً في المجال V (0.1 ÷ 0)، وسندرس الحالات الخاصة في الفقرة (4.12). يبيِّن الشكل (12.12) أشكال الدارات التكاملية التي تحوي بوابات من عائلة TTL (74xx) وعوائلها الفرعية 74Fxx و74LS، أما الشكل (13.12) فيبيِّن أشكال الدارات التكاملية التي تحوي بوابات من عائلة CMOS بعوائلها الفرعية (74HCxx) و(4000B).



الشكل (12.12): أشكال بعض الدارات التكاملية من عائلة TTL.



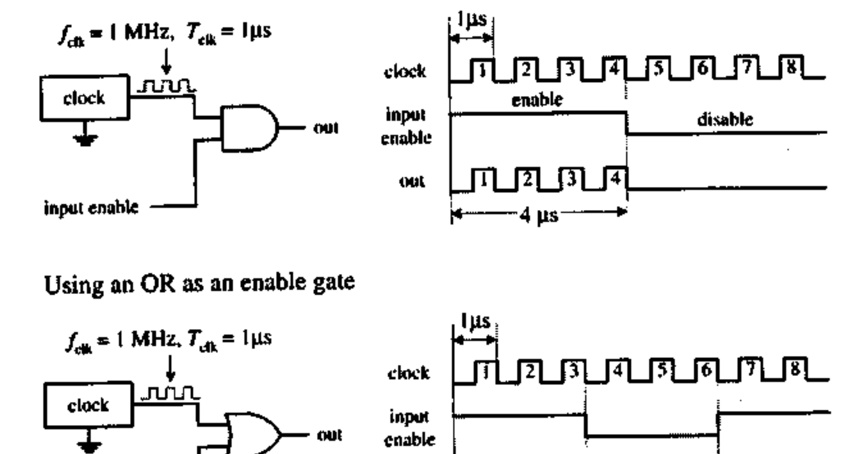
الشكل (13.12): أشكال بعض الدارات التكاملية من عائلة CMOS.

3.2.12 تطبيقات بوابة منطقية واحدة (وحيدة)

قبل أن ننتقل إلى قلب تطبيقات البوابات المنطقية الذي يتضمن استخدام عدة بوابات منطقية مع بعضها لتكوين دارة منطقية مركبة لاتخاذ قرار، سنأخذ فكرة عن بعض الأمثلة البسيطة التي تتطلب استخدام بوابة واحدة فقط.

تمكين/إلغاء تمكين

بوابة التمكين أو إلغاء التمكين هي بوابة تتحكم بمرور موجة، ولتكن هذه الموجة هي نبضات clock المطبقة على أحد مداخل البوابة، أما المدخل الآخر للبوابة فيعمل كمدخل تحكم للتفعيل (التمكين) أو عدم التمكين. تستخدم بوابات التمكين/عدم التمكين عادة في النظم المنطقية (digital systems) لتمكين أو منع المعلومات من الوصول إلى الأجهزة المختلفة. يبيِّن الشكل (14.12) دارتي تمكين/عدم تمكين. تستخدم في الدارة الأولى بوابة AND وتستخدم في الثانية بوابة OR. تستخدم بوابات OR وAND كثيراً كبوابات تمكين أو عدم تمكين.



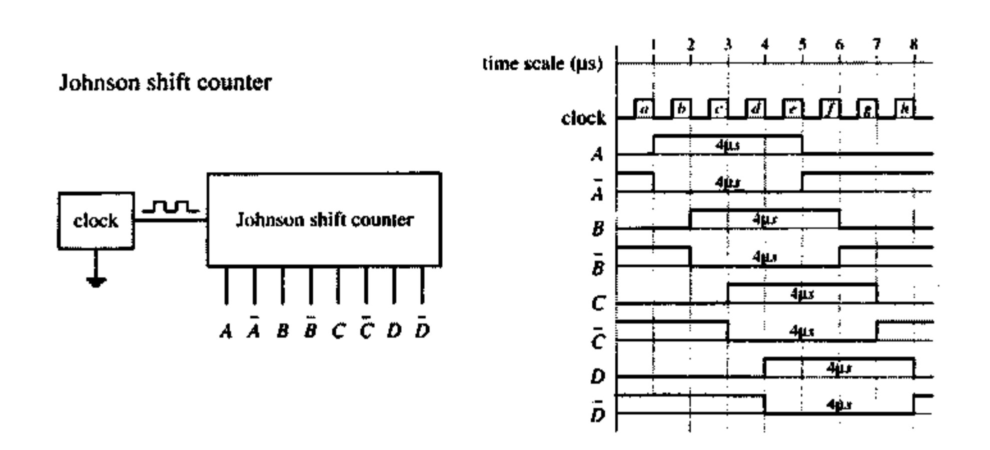
الشكل (14.12): بوابات OR وAND في دارات تمكين.

في الجزء العلوي من الشكل تستخدم بوابة AND كبوابة تمكين، وعندما يكون مدخل التمكين في حالة high تمر نبضات clock إلى الخرج. يوضع مدخل التمكين في حالة high لمدة (4 μS) فيسمح بتمرير (4) نبضات clock إلى الخرج (وذلك بفرض أن دور نبضات clock T_{CLK} = 1 μs). عندما يوضع مدخل التمكين على حالة Low يصبح خرج البوابة Low ولا تمر نبضات clock إلى الخرج. في الجزء السفلي من الدارة تستخدم بوابة OR كبوابة تمكين، وعندما يكون مدخل التمكين high فإن الخرج سيكون high بغض النظر عن تغيرات وضعيات نبضات clock على المدخل الآخر، وعندما يوضع مدخل التمكين على حالة (Low) تمر نبضات clock من المدخل إلى الخرج.

التوليد الموجي

يمكن باستخدام وظائف التمكين/عدم التمكين للبوابة المنطقية، كما هو موضح في المثال السابق وباستخدام مولد موجة تكرارية، الحصول على أشكال خاصة من الموجات التي يمكن استخدامها للتحكم المنطقي للدارات التتابعيَّة ويعتبر عداد جونسون (Johnson counter) مثالاً على مولد موجات، وعداد جونسون مبيَّن في الشكل (15.12) وسوف ندرسه في

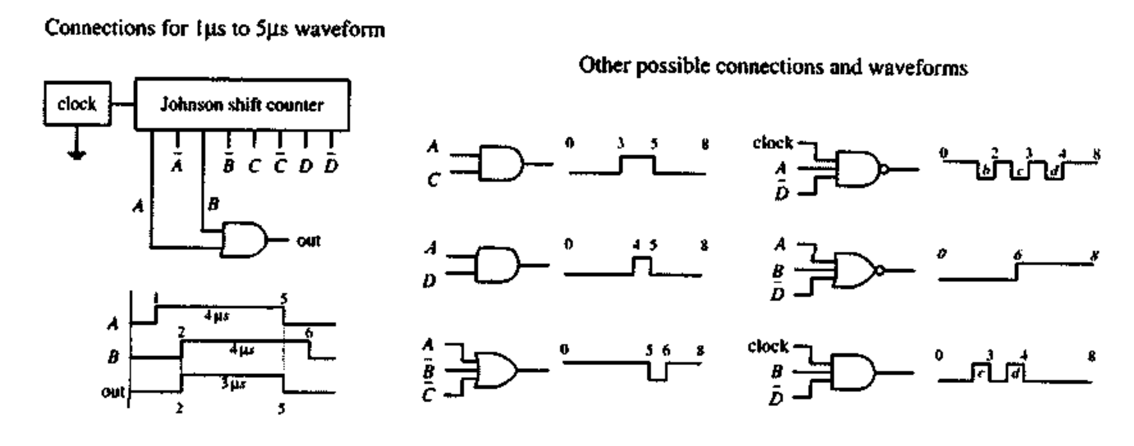
الفقرة (8.12) وسنركز الآن ببساطة على مخارج العداد. يستخدم عداد جونسون المبيَّن في الشكل نبضات clock لتوليد أشكال مختلفة من الموجات كما هو مبيَّن في مخطط التوقيت. تكون المخارج A، B، C وD في حالة high لمدة (4 µs) أي لمدة تساوي دور أربع نبضات clock، وكل واحدة مزاحة عن الأخرى بمقدار (1 µs)، أما المخارج $\bar{A}$ ، $\bar{B}$ ، $\bar{C}$ و$\bar{D}$ فهي معاكسة للمخارج A، B، C وD على الترتيب.



الشكل (15.12): عداد جونسون وأشكال نبضات مخارجه.

قد يكون هناك تطبيق معين يحتاج نبضات تكون في حالة high لمدة (4 µs) ثم تعود إلى حالة Low في وقت محدد، وهذا ما يؤمنه العداد. ولكن ماذا تفعل إذا كان التطبيق يحتاج لنبضات تكون في حالة high لمدة (3 µs) وتبدأ عند الـ (2 µs) وتنهي عند الـ (5 µs)، كما في الشكل (15.12) وهنا يأتي دور البوابات المنطقية فمثلاً إذا وصلت مدخل بوابة AND إلى خرج العداد (A) والمدخل الثاني للبوابة إلى المخرج B من العداد فإنك تحصل على نبضة في خرج بوابة AND تمتد من 2 إلى 5 µs في حالة (high).

من 1 µs إلى 2 µs يكون خرج بوابة AND على حالة Low (لأن A = 1 وB = 0) ومن 2 µs إلى 5 µs يكون خرج بوابة AND على حالة high لأن (A = 1 وB = 1) ومن (5) إلى 6 µs يكون خرج بوابة AND على حالة Low لأن (A = 0 وB = 1). انظر الشكل (16.12).



الشكل (16.12): استخدام البوابات المنطقية للحصول على نبضات خاصة من مخارج عداد جونسون.

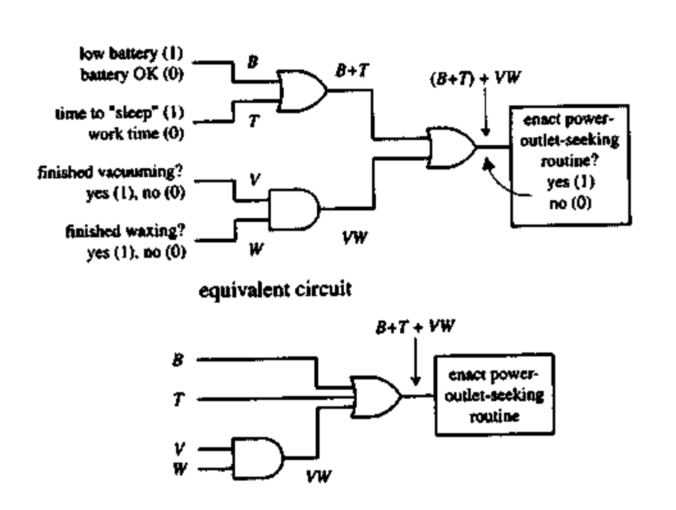
يمكن الحصول على أشكال أخرى خاصة من النبضات باستخدام بوابات مختلفة موصولة مع مخارج عداد جونسون وتعطى في الشكل (16.12) ست حالات مختلفة من الوصل مع المخارج والنبضات التي يمكن الحصول عليها.

4.2.12 المنطق التركيبي

يتضمن المنطق التركيبي تجميع عدة بوابات مع بعضها لتشكيل دارة أكثر فائدة وقادرة على القيام بوظائف معقدة. سنقوم على سبيل المثال بتصميم دارة منطقية مستخدمة لإعطاء تعليمات إلى روبوت robot حراسة لإعادة شحن نفسه بنفسه وذلك فقط عندما تتحقق مجموعة شروط، ويُعرَّف الشرط (إعادة شحن نفسه (recharge itself) كما يلي:

- عندما يكون جهد البطارية منخفضاً ويشار إلى ذلك بحالة high من دارة مراقبة البطارية.
- عند انتهاء يوم العمل (ويشار إلى ذلك بحالة high من دارة مؤقت).
- عندما يكون التفريغ كاملاً (وعند هذه الحالة تعطي دارة مراقبة التفريغ حالة high).
- عند اكتمال التشمع waxing (وهنا أيضاً يظهر high على خرج دارة مراقبة التشمع).

لنفرض الآن أن تكرارية (routine) البحث عن مأخذ الطاقة الكهربائية تُفعل عند تطبيق high على مدخلها. يبيِّن الشكل (17.12) دارتين تركيبيتين بسيطتين تحققان التابع المنطقي (Logic function) المطلوب للـــ robot، وتستخدم الدارتان عدداً مختلفاً من البوابات ولكنهما تحققان نفس التابع المنطقي، ويبقى السؤال هو كيف وصلنا إلى هذه الدارات؟ في كل دارة ليس من الصعب التنبؤ بالبوابات المطلوبة وببساطة يتم استبدال كلمة (and) الموجودة ضمن العبارة الشرطية ببوابة AND في الدارة المنطقية واستبدال كلمة OR الواردة في العبارة الشرطية ببوابة OR ثم تكمل.



B	T	V	W	B+T	VW	(B+T)+VW
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	0	1	1	0	1	1
0	1	0	0	1	0	1
0	1	0	1	1	0	1
0	1	1	0	1	0	1
0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	0	1
1	0	0	1	1	0	1
1	0	1	0	1	0	1
1	0	1	1	1	1	1
1	1	0	0	1	0	1
1	1	0	1	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1

الشكل (17.12): دارات تركيبيّة

اعتمدنا ببساطة على البديهة في بناء الدارة التركيبيّة في المثال السابق، ولكن عند الرغبة في تصميم دارات أعقد لا يمكن فقط الاعتماد على البديهة في تحديد البوابات اللازمة وطريقة وصلها مع بعضها كي يُحقق التابع المنطقي المطلوب، وفي مثل هذه الحالات تستخدم لغة رمزية (symbolic language) تسمى جبر بول (Boolean algebra) وتتعامل هذه اللغة مع متحولات تأخذ حالات صح (true) وخطأ (false)، وبالنسبة لمثال الروبوت تصبح المعادلة البوليانية (Boolean Expression) كما يلي:

$$E = (B + T) + V.W$$

ومعنى هذه العبارة هو إذا كانت البطارية (B) منخفضة الجهد أو إذا انتهى يوم العمل (T) أو إذا كان V وW (V التفريغ وW التشمع) قد اكتمل عندها يجب تفعيل روتينية البحث عن مصدر القدرة (E).

وفي العبارة (المعادلة) تم استبدال كلمة (or) بـــ (+) وكلمة (and) بجداء أي ضرب متحولين (V) و(W) ويكتبان بجانب بعض. يمكن التعبير عن حالة (true) بـــ (1) وعن حالة (false) بـــ (0) وذلك بفرض استخدام المنطق الموجب. واعتماداً على ذلك نصل إلى النتائج التالية:

E = (B + T) + VW

E = (1 + 1) + (1.1) = 1 + 1 = 1

وهذا يعني أن جهد البطارية منخفض، أو يوم العمل قد انتهى أو التفريغ قد انتهى أو انتهت الحراسة والنتيجة هي ضرورة الذهاب إلى الشحن

E = (1 + 0) + (0.0) = 1 + 0 = 1

البطارية هنا أصبحت منخفضة الجهد ولكن العمل لم ينته و لم ينته التفريغ و لم تنته الحراسة ولكن يجب الذهاب للشحن

E = (0 + 0) + (1.0) = 0 + 0 = 0

البطارية جهدها مناسب وما يزال الـــ robot ضمن يوم العمل و لم ينته التفريغ و لم تنته الحراسة ولا ضرورة للذهاب إلى الشحن.

E = (0 + 0) + (1.1) = 0 + 1 = 1

وباختصار فإن الحالة هنا هي انتهاء كافة الأعمال المطلوبة من الـــ robot ويمكنه الذهاب إلى الشحن.

E = (0 + 0) + (0.0) = 0 + 0 = 0

وهنا نلاحظ أن الأعمال المطلوبة من الروبوت لم تنته ولا يمكنه الذهاب إلى الشحن. يبيِّن الجدول المبيَّن في الشكل (17.12) كافة الحالات الممكنة الباقية.

يبيِّن لك مثال الروبوت كيفية التعبير عن توابع AND وOR في معادلات جبر بول، ولكن ماذا عن عمليات NAND، NOT وNOR وXOR وXNOR؟ يمكن التعبير عن هذه العمليات في جبر بول كما يلي:

نعبر عن NOT بوضع خط (bar) فوق المتحول المعكوس، ونعبر عن NAND بوضع خط فوق عبارة AND ونفس الشيء بالنسبة لـــ NOR. أما XOR فنعبر عنها بالرمز ⊕ ونبيِّن في الشكل (18.12) رموز البوابات المذكورة ورموز متحولات مداخلها وكيفية التعبير عن تابع الخرج.

$Y = AB$ $Y = A+B$ $Y = \overline{A}$

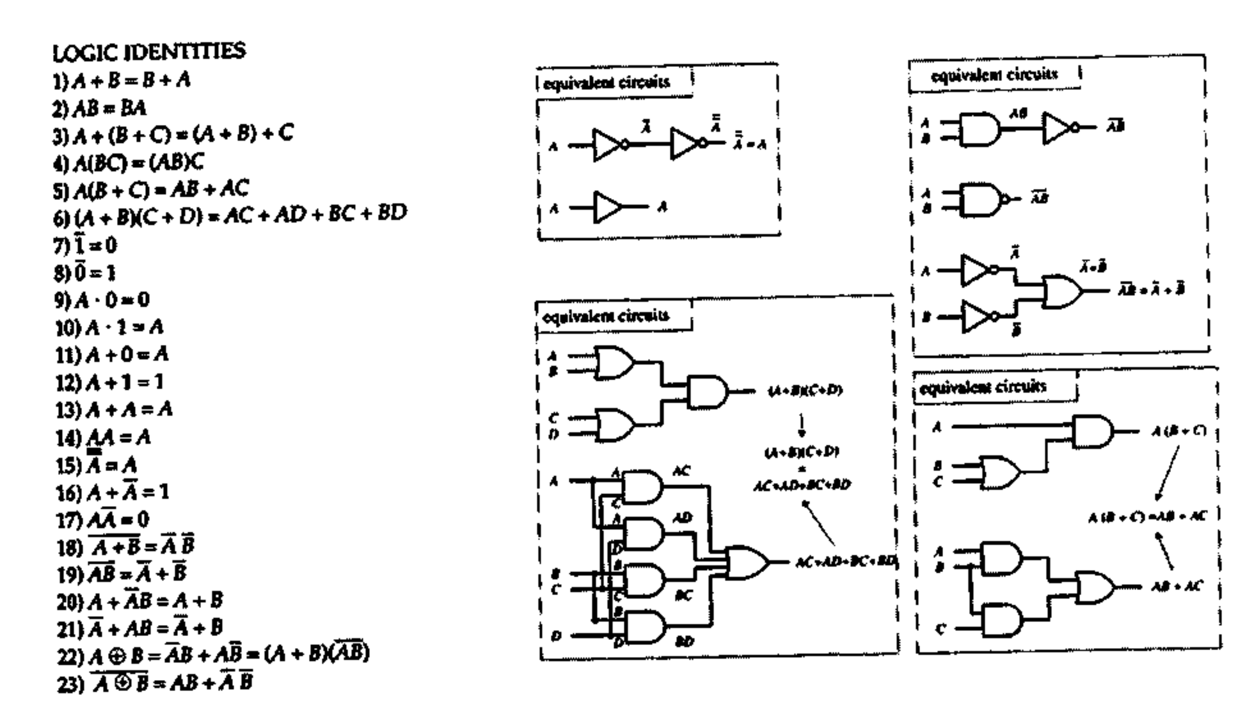
$Y = \overline{AB}$ $Y = \overline{A+B}$ $Y = A \oplus B$

$Y = ABC$ $Y = A+B+C$ $Y = \overline{A \oplus B}$

$Y = \overline{ABC}$ $Y = \overline{A+B+C}$

الشكل (18.12): رموز مختلف البوابات وتوابع خرجها.

هناك خصائص لجبر بول يمكن استخدامها من أجل تبسيط العلاقات وبالتالي لتبسيط الدارات المنطقيّة ولهذه القوانين أسماء مثل القانون التبديلي في الجمع (commutative law of addition) والقانون التجميعي في الجمع (associative law of addition) وقانون التوزيع (distribution law) وغيرها. ولكن وبدلاً من الاهتمام بأسماء القوانين والخصائص نبيّن لك في الشكل (19.12) قائمة بالقوانين الهامة ونبيّن أيضاً كيفية وصل بوابات مناسبة لتحقيقها.



الشكل (19.12): قوانين جبر بول.

مثال:

سنوجد الآن معادلات توابع خرج (في جبر بول) لدارة الشكل (20.12) ونستخدم قوانين جبر بول لتبسيط الدارة.
يمكن كتابة تابع الخرج للدارة كما يلي:

$$Out = (A + B)\bar{B} + \bar{B} + BC$$

وحسب الخاصيّة (5):

$$(A + B)\bar{B} = A\bar{B} + B\bar{B}$$
$$Out = A\bar{B} + B\bar{B} + \bar{B} + BC$$

وحسب الخاصية (17) فإن ($B\bar{B} = 0$) والخاصية (11) فإن ($B + O = B$):

$$Out = A\bar{B} + O + \bar{B} + BC = A\bar{B} + \bar{B} + BC$$
$$= \bar{B}(A + 1) + BC$$

وحسب الخاصية (12) نلاحظ أن ($A + 1 = 1$) لذلك يكون:

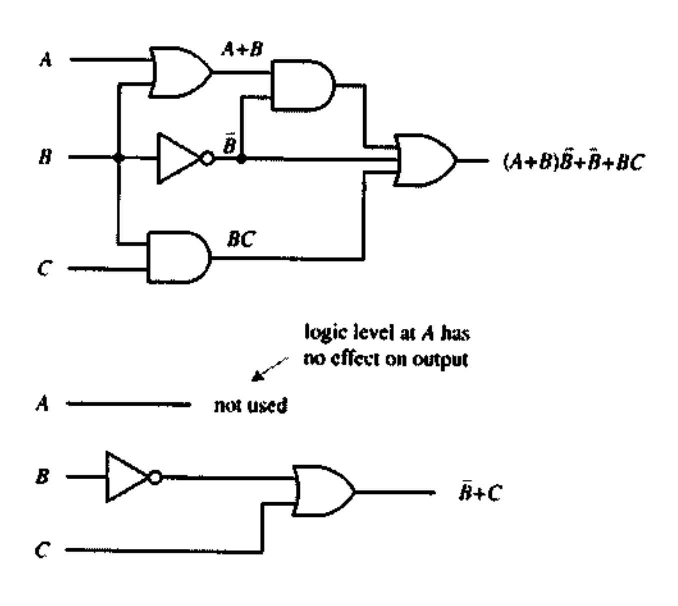
$$Out = \bar{B} + BC$$

وحسب الخاصية (21) نجد أن:

$$Out = \bar{B} + C;$$

لاحظ غياب A من المعادلة نهائياً.

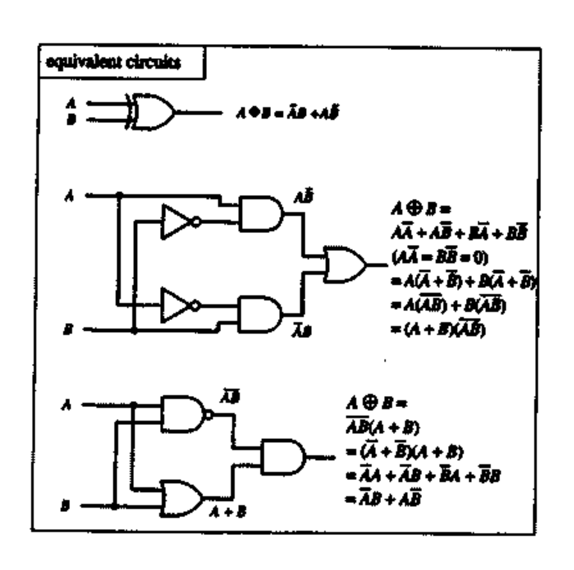
وتبيِّن الدارة المبسطة الموجودة أسفل الشكل (20.12) أن المدخل A فعلاً لا يؤثر على تابع الخرج. من المهم هنا أن تلاحظ أن الدارة الأساسية فيها خمس بوابات والدارة النهائية فيها فقط بوابتين والدارتين تعطيان نفس التابع المنطقي في الخرج، لذلك يعتبر استخدام قوانين جبر بول هاماً في اختصار الدارات والتوابع المنطقيَّة.

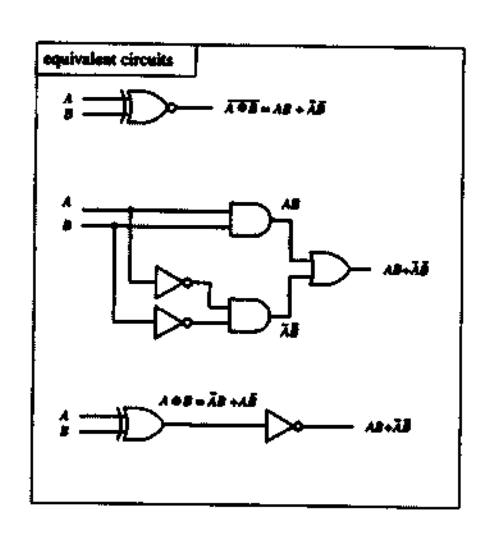


الشكل (20.12): دارة منطقية ودارتها المكافئة المبسطة.

التعامل مع بوابات XOR وXNOR (الخواص 22 و23)

سنأخذ الآن فكرة عن بعض الخواص التي تتضمن بوابات (XOR)، الخاصيّة (22) و(XNOR) الخاصيّة (23). يبيِّن الجزء اليساري من الشكل (21.12) الدارات المكافئة لبوابات (XOR) وفي الدارتين المكافئتين السفليتين يُبرهن على الخاصية (22) باستخدام الاختصار وفقاً لقوانين جبر بول. أما في الجزء اليميني من الشكل فتعطى الدارات المكافئة لبوابة (XNOR) ويمكن استخدام الخاصية (22) في برهان الخاصية (23).





الشكل (21.12): الدارات المكافئة لبوابات XOR وXNOR

نظرية ديمورغان (الخواص 18 و19)

يمكن استخدام نظرية مفيدة جداً في تبسيط الدارات التي تحوي بوابات NAD وNOR باستخدام نظرية ديمورغان وتساعد هذه النظرية على تبسيط الحدود التي يوجد فيها خط عاكس فوق متحولين أو أكثر إلى عبارة تحوي خطوطاً ولكن فقط على متحول واحد كما يلي:

$\overline{A.B} = \overline{A} + \overline{B}$ (متحولين فقط)

$\overline{A.B.C} = \overline{A} + \overline{B} + \overline{C}$ (ثلاثة متحولات أو أكثر)

$\overline{A+B} = \overline{A}.\overline{B}$; (متحولين)

$\overline{A+B+C} = \overline{A}.\overline{B}.\overline{C}$; (ثلاثة متحولات أو أكثر)

وأبسط طريقة لبرهان صحة هذه الخصائص هي استخدام الشكل (22.12). وملاحظة أن جداول الحقيقة للدارات المتكافئة هي نفسها. لاحظ وجود الدوائر العاكسة (inversion bubbles) على مداخل البوابات.

وتعني هذه الدوائر أن المتحولات (A) و(B) وقبل دخولها إلى البوابة تُعكس. وهذه الدوائر هي اختصار لبوابات NOT.

A	B	$\overline{A \cdot B}$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

A	B	$\overline{A}+\overline{B}$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

A	B	$\overline{A+B}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

A	B	$\overline{A} \cdot \overline{B}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

الشكل (22.12): برهان نظرية ديمورغان.

هنا قد ينشأ في ذهنك السؤال التالي:

لماذا نستخدم رمز بوابة OR بمداخل معكوسة بدلاً من بوابة NAND؟

أو لماذا نستخدم بوابة AND بمداخل معكوسة بدلاً من بوابة NOR؟

والجواب هو أن الخيار في استخدام أي من هذه البوابة متروك لك، وذلك حسب ما تراه أنت منطقياً عند تعاملك مع الدارة فقد يكون الأسهل لك أن تفكر بجمع (ORing) أو ضرب (ANDing) المداخل المعكوسة بدلاً من أن تعكس حاصل ضرب المداخل (NANDing) أو تعكس حاصل جمع المداخل (NORing). وبشكلٍ مشابه قد يكون من الأسهل وضع جدول حقيقة والعمل مع معادلات جبر بول باستخدام بوابات معكوسة المداخل.

ومن السهل عادة وضع جداول حقيقة ومعادلات بولية لا تحوي متحولات كثيرة موضوعة تحت خط عكس. عند تنفيذ الدارة الفعلية قد تعود إلى بوابات NAND وNOR لأنها لا تحتاج إلى عواكس إضافية في مداخلها.

دفع الدوائر (الفقاعات)

توجد طريقة مختصرة في تكوين الدارات المنطقية المكافئة، وتعتمد هذه الطريقة على قوانين ديمورغان في استخدام ما يُسمى دفع الدوائر.

الشكل (23.12): دفع الدوائر.

ونعتمد في دفع الدوائر على الطريقة التالية: بدِّل بوابة AND ببوابة OR أو بدِّل بوابة OR ببوابة AND ثم أضف دوائر إلى المداخل والخرج إذا كانت هذه الدوائر غير موجودة على الأطراف المناظرة للبوابة الأساسية، أما إذا كانت هناك دائرة على مدخل البوابة الأساسية فإن المدخل المقابل له في البوابة المكافئة يُرسم بدون دائرة وينطبق ذلك على الخرج.

يمكن البرهان على صحة العمل من خلال جداول الحقيقة للبوابة الأساسية وللبوابة ذات الدوائر المدفوعة (pushed bubbles)، أو بكتابة تابع الخرج لكل بوابة واستخدام قوانين ديمورغان لبرهان تكافؤ الحالتين. يبيِّن الشكل (23.12) بعض الأمثلة عن دفع الدوائر.

القدرات العمومية لبوابات NAND وNOR

تسمى بوابات NAND وNOR بوابات عمومية لأنه يمكن تحقيق كافة البوابات المنطقية بواسطة بوابات NAND أو بوابات NOR، وهذه الميزة مفيدة جداً فمثلاً إذا لزمك بوابات XOR ولم تتوفر لديك دارة متكاملة IC لها فبإمكانك استخدام بوابات NAND مثلاً لتكوين بوابة XOR (تتوفر بوابات NAND في الدارة المتكاملة 74HC00). يبيِّن الشكل (24.12) كيفية تشكيل مختلف البوابات بواسطة بوابات NAND وNOR.

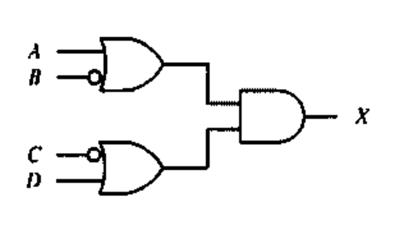
بوابات AND، OR، عكس (AOIs)

عند اختصار معادلة بوليانية، فإن المعادلة الناتجة ستكون من أحد الشكلين التاليين: جداء مجاميع (product-of-sums) ويرمز له بالرمز (POS) أو مجموع جداءات (sum-of-products) ويرمز له بالرمز (SOP). تظهر عبارات (POS) كمتحولين أو أكثر مجموعين مع بعضهما (ORed) ومضروبين (ANDed) مع متحولين آخر مجموعين (ORed).

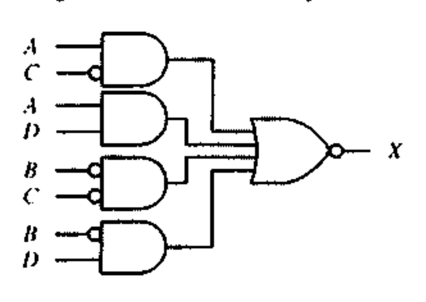
أما عبارات SOP فتشكل ببساطة بضرب المتحولات بواسطة بوابات AND ثم تطبيق مخارج بوابات NND على دارة جمع OR يبيِّن الشكل التالي (25.12) دارتين منطقيتين تعطيان نفس التابع المنطقي (دارتين متكافئتين) ولكن الدارة اليساريَّة تعطي تابع POS أما الدارة اليمينية فتعطي تابعاً من نوع SOP.

Logic gate	NAND equivalent circuit	NOR equivalent circuit
NOT	A, $\overline{AA}=\bar{A}$	A, $\overline{A+A}=\bar{A}$
AND	A, B, $\overline{AB}$, $\overline{\overline{AB}}=AB$	A, $\overline{A+A}=\bar{A}$, B, $\overline{B+B}=\bar{B}$, $\overline{\bar{A}+\bar{B}}=\bar{\bar{A}}\bar{\bar{B}}=AB$
NAND		A, B, $\overline{AB}$
OR	A, $\bar{A}$, B, $\bar{B}$, $\overline{\bar{A}\bar{B}}=A+B$	A, B, $\overline{A+B}$, $\overline{(\overline{A+B})+(\overline{A+B})}=A+B$
NOR	A, $\bar{A}$, B, $\bar{B}$, $\overline{\bar{A}\bar{B}}=A+B$, $\overline{A+B}$	
XOR	A, B	A, B
XNOR	A, B	A, B

الشكل (24.12): تشكيل بوابات مختلفة من بوابات NAND أو NOR.



$X=(A+\bar{B})(\bar{C}+D)$



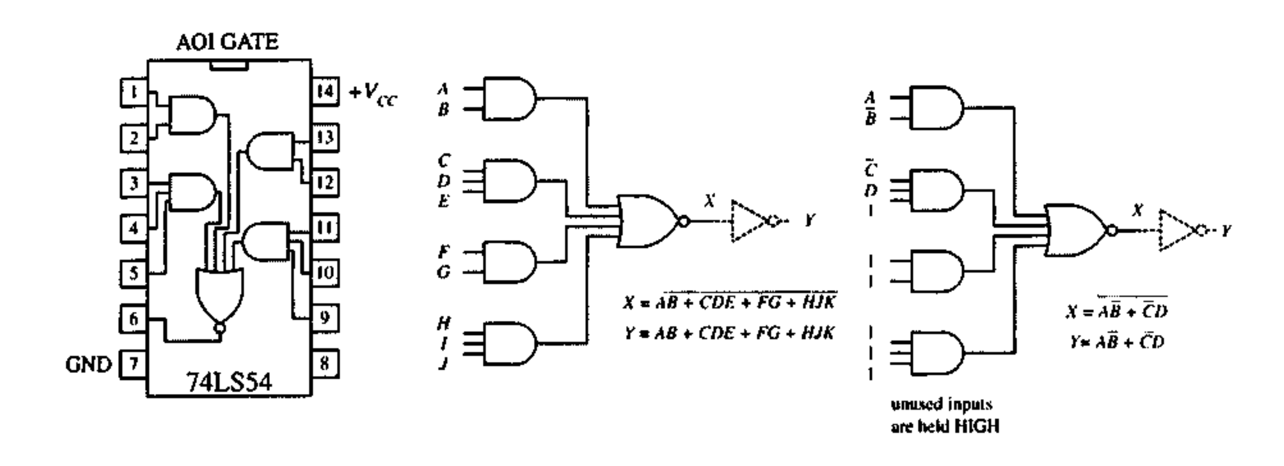
$X=A\bar{C}+AD+\bar{B}C+\bar{B}D$

الشكل (25.12): دارات SOP وPOS.

والسؤال المشروع هنا هو أي الدارتين أفضل من الناحية التصميميَّة؟

دارة (POS) أم دارة (SOP)؟ يبدو من الشكل أن دارة (POS) هي الأفضل لأنها تحتاج إلى عدد أقل من البوابات، ولكن دارة SOP جيدة أيضاً بسبب سهولة التعامل مع العلاقات والمعادلات البوليانية فقد تتساءل ما هي الدارة (SOP) أو (POS) التي تستخدمها لتشكيل جدول الحقيقة؟ قد يكون واضحاً أن دارة SOP هي الأسهل، وهناك سبب آخر يدعو إلى استخدام دارات SOP في التصميم وهو وجود دارات متكاملة خاصة (Special ICs) تسمى AND-OR-Invert ويرمز لها اختصاراً (AOI) وهذه الدارات مصممة للتعامل مع عبارات SOP فمثلاً الدارة 74LS54 (دارة AOI متكاملة) المبينة في الشكل (26.12) تُعطي في خرجها معكوس مجموع الجداءات أي معكوس SOP ومن الشكل يتضح أنه يمكن تشكيل جداءات بواسطة بوابات AND موجودة ضمن الدارة بمدخلين وثلاثة مداخل. يُوصل عاكس مع خرج بوابة NOR الموجودة ضمن الدارة 74LS54 للحصول على SOP لكافة المداخل.

إذا بقيت بعض المداخل دون استخدام يجب وصل هذه المداخل مع high، كما في المثال المبيَّن في نفس الشكل. تتوفر دارات (AOI ICs) بتوصيلات داخلية مختلفة، ويمكنك العودة إلى الكتالوكات لمعرفة الأنواع المتوفرة.



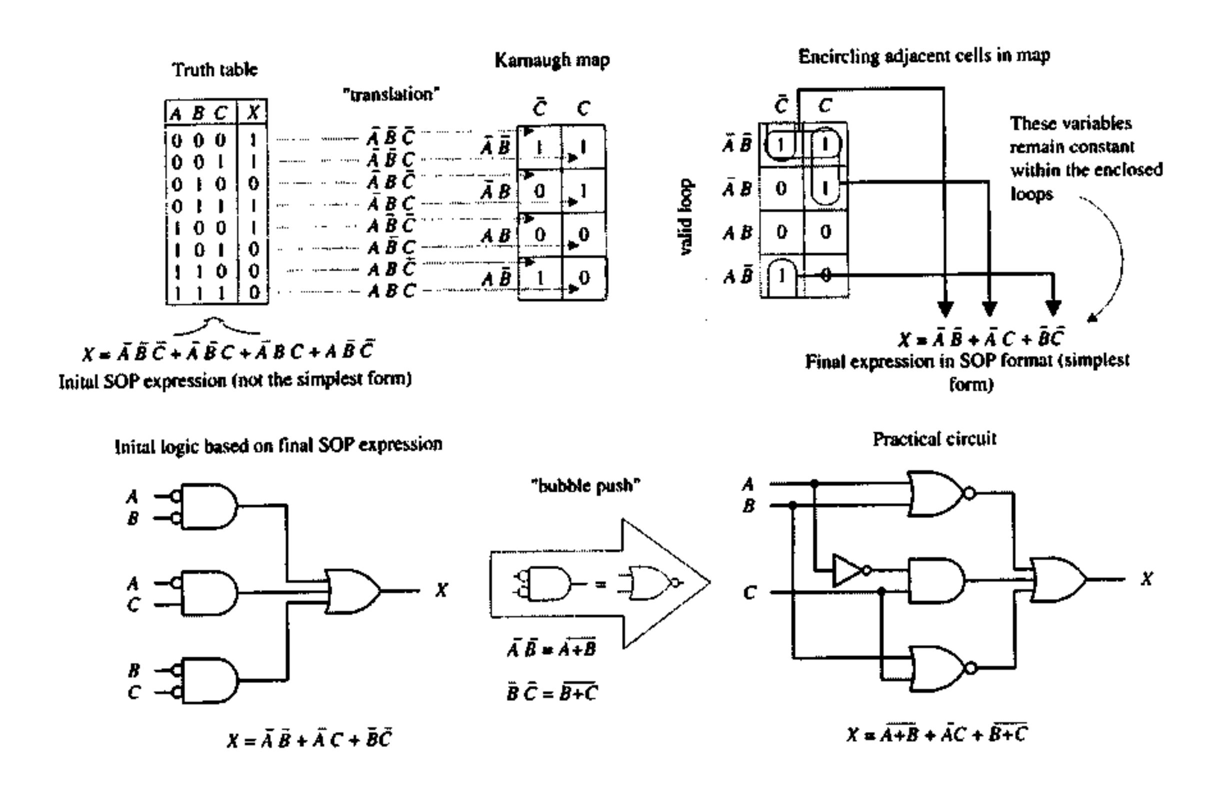
الشكل (26.12): بنية الدارة 74LS54 ومثال عن استخدامها.

5.2.12 تبسيط الدارات بواسطة مخططات كارنوف

تعرفنا في الفقرات السابقة على كيفية استخدام قوانين جبر بول وخصائصه لاختصار التوابع المنطقية، وتوضح لنا ضرورة هذا الاختصار لأنه يجعل الدارات النهائية أبسط ويقلل عدد البوابات اللازمة، إلا أن استخدام قوانين جبر بول للاختصار عندما يكون عدد المتحولات المنطقية كبيراً يصبح صعباً. قد يكون أسهل حل للتخلص من مهمة اختصار التوابع المنطقية هو توفر برنامج حاسوبي يقبل توابع حقيقية ويعطيك التابع المختصر أو ربما يعطيك الدارة المنطقية المختصرة النهائية، ولكن مثل هذا البرنامج يحتاج إلى وقت وإبداع لإنجازه. إذا لم يتوفر لديك مثل هذا البرنامج ماذا تفعل؟ هل تبقى مقيداً باستخدام قوانين جبر بول للاختصار؟ بالطبع لا إذ توجد طريقة للاختصار تعتمد على ما يسمى مخطط كارنوف وفيها يُؤخذ جدول حقيقة (أو علاقة مكتوبة) ويُحوَّل إلى مخطط كارنوف، ثم تُطبق بعض القوانين والقواعد في التعامل مع المخطط فتحصل منه بنتيجة ذلك على العلاقة النهائية المبسطة لتابع الخرج المنطقي المطلوب للدارة. وتستخدم مخططات كارنوف للاختصار إذا كانت لديك ثلاثة متحولات أو أربعة، أما إذا كان عدد المتحولات أكثر من (4) فإن استخدام مخططات كارنوف يصبح معقداً، ونبيِّن فيما يلي استخدام مخطط كارنوف للاختصار إذا كانت لدينا ثلاثة متحولات منطقيَّة في منظومة منطقية معينة.

1. اختر جدول حقيقة، وستختار جدول الحقيقة المعطى في الشكل (27.12) وإذا كان لديك تابع خرج منطقي حوِّل هذا التابع إلى مجموع جداءات SOP واستخدم معادلات مجموع الجداءات SOP لتكوين جدول حقيقة ويبيِّن الشكل (26.12) كيفية القيام بذلك.

2. حوِّل جدول الحقيقة إلى مخطط كارنوف. مخطط كارنوف يشبه جدول الحقيقة ولكن تمثل المتحولات فيه على محورين، وبتحويل جدول الحقيقة إلى مخطط كارنوف يتم الحصول على مجموعة من الواحدات (1 s) والأصفار (0 s)، انظر الشكل (27.12) لمعرفة كيفية تحقيق ذلك أو تنفيذه.



الشكل (27.12): مخطط كارنوف.

3. بعد تشكيل مخطط كارنوف تُجمَّع الواحدات في مجموعة مكونة من (2) أو (4) أو ثمانية واحدات، وكلما كان عدد المجموعات التي تكونها أكبر كان التابع المبسط الذي تحصل عليه أبسط، لذلك عليك أخذ كل تجمعات الواحدات الممكنة.

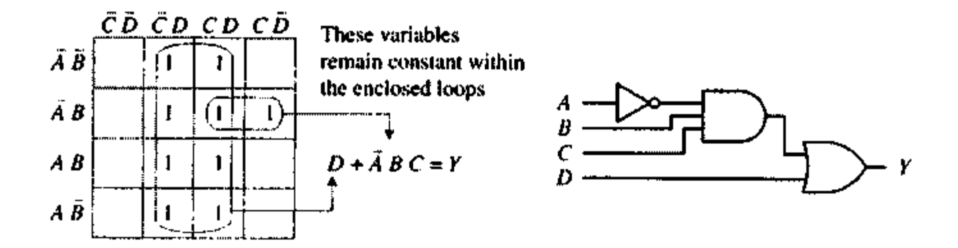
4. حدِّد المتحولات التي تبقى ثابتة في كل مجموعة واحدات (1 s) واكتبها في معادلة من نوع SOP عن طريق جمع كل هذه الحدود مع بعضها.

وكلمة ثابت هنا تعني أن المتحول وعكسه لا يظهران في المجموعة نفسها، فمثلاً في المجموعة الأفقية في الشكل (27.12) تلاحظ أن المتحولات الثابتة (constant variables) هي $\bar{A}\bar{B}$ وأن المتحول C أو $\bar{C}$ لم يؤخذا بالاعتبار لأن C و $\bar{C}$ يظهران في هذه المجموعة.

5. إن معادلة SOP التي تحصل عليها هي التابع المنطقي المختصر ويمكنك تكوين الدارة المنطقية اعتماداً عليها. قد تحتاج إلى القيام بعملية دفع الدوائر كي تكون الدارة النهائية عملية، انظر الشكل (27.12).

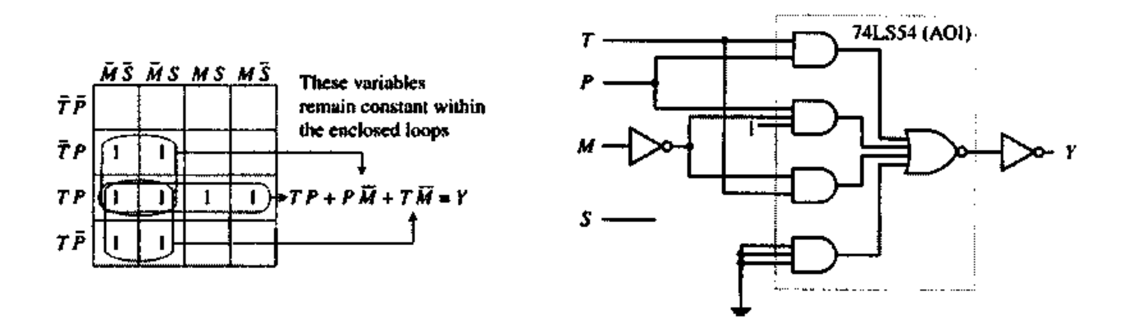
يمكن تطبيق نفس الخطوات لتكوين مخطط كارنوف لأربعة متحولات، ولكن عليك هنا استخدام مخطط مكون من (4 × 4) مربع لاستيعاب كل الحالات المنطقية الممكنة. ويُعطى في الشكل (28.12) مثال على تكوين مخطط كارنوف لجدول

حقيقة فيه أربعة متحولات منطقية (أو لتابع خرج منطقي فيه أربعة متحولات). ويبيِّن الشكل تابع الخرج المنطقي بعد تبسيطه بمخطط كارنوف والدارة المنطقية التي تحقق التابع.



الشكل (28.12): مثال لمخطط كارنوف بأربع متحولات.

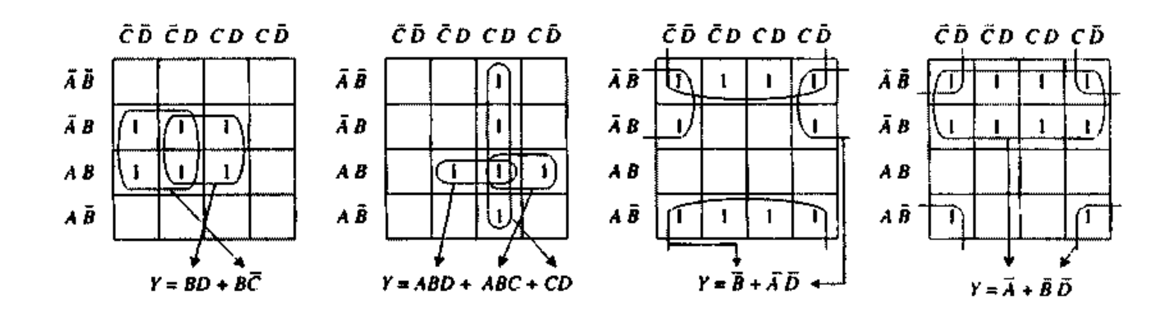
وفيما يلي مثال يبيِّن استخدام دارة متكاملة AOI IC لتحقيق العلاقة النهائية SOP بعد اختصارها بمخطط كارنوف. استخدمت في هذا المثال رموز منطقيّة غير الرموز التقليديّة A، B، C، D كي لا تظن أن الرموز A، B، .... إلخ واجبة الاستخدام دوماً، ويمكنك اختيار أية رموز تشاء.



الشكل (29.12): استخدام AOI متكاملة لتنفيذ تابع بعد اختصاره.

تجميعات أخرى للواحدات (1 s) في مخطط كارنوف لأربعة متحولات

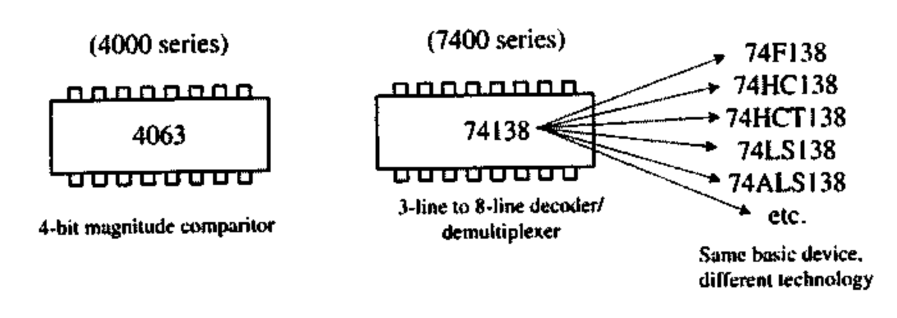
يبيِّن الشكل (30.12) مجموعة مختلفة من تشكيلات الواحدات (1 s) في مخطط كارنوف لأربعة متحولات.



الشكل (30.12): مجموعة من تشكيلات (تجمعّات) الواحدات.

3.12 العناصر التركيبيّة (Combinational Devices)

الآن وبعد أن تعرفت على استخدام البوابات المنطقية لتمثيل (تحقيق) التوابع المنطقية المستنتجة من جداول الحقيقة ومن معادلات توابع الخرج المنطقي، فقد حان الوقت لتأخذ فكرة عن بعض التوابع (functions) الشائعة في العالم الحقيقي للإلكترونيات الرقمية، وكما سترى فإن هذه التوابع تنفذ بواسطة دارة متكاملة (IC) تحوي بداخلها كل المكونات المنطقية اللازمة. وقبل أن نبدأ بذلك نشير إلى أن الدارات التكاملية التي ستذكر هنا لها أرقام (كما هي الحال في الدارات المتكاملة للبوابات) وهي من عائلة 74xx أو 4000 ومن المهم أن تعرف مثلاً أن الدارة المتكاملة 74138 من عائلة TTL الأساسية متآلفة بوظائف الأرجل (غالباً وليس دائماً) مع الدارات المماثلة من العوائل الفرعية مثل 74F138، و74HC128 (من عائلة CMOS) ومع 74LS138، وتختلف هذه الدارات المتكاملة عن بعضها في الأداء العام (كالسرعة speed، واستهلاك الطاقة power consumption، ومستويات الجهود) وسوف نتعرض لهذه التفاصيل لاحقاً.



الشكل (31.12): أشكال بعض الدارات المتكاملة التي تقوم بوظائف محددة.

1.3.12 النواخب (نواخب المعطيات) والمفاتيح ثنائية الحالة

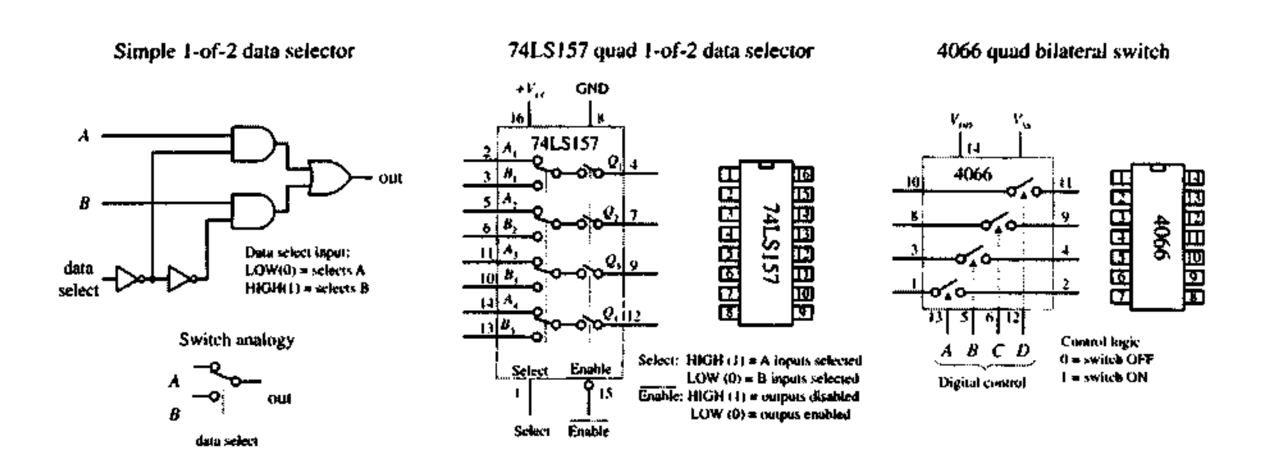
تعمل النواخب كمفاتيح متحكم بها رقمياً (يستخدم مصطلح ناخب معطيات (Data Selector) عند استخدام الدارة المتكاملة كمفتاح وحيد القطب ثنائي الوضع (SPDT) ويستخدم مصطلح multiplexer عندما يتجاوز عدد وضعيات المفتاح الوضعيتين، مثلاً SP8T)، وسوف نستخدم هذه المصطلحات وفقاً للمعيار المذكور هنا أي SPDT = Data Selector وSPMT = multiplexer باعتبار n > 2. يوضح الشكل (32.12) ناخب معطيات بسيطاً (1) و(2)، (1-of-2) مكوَّن من بوابات منطقية.

يتحكم مدخل انتخاب المعطيات (Data Select Input) بالدخل A أو B الذي يمر إلى الخرج. عندما يكون مدخل انتخاب المعطيات في حالة high، يمر الدخل A إلى الخرج ويحجب الدخل B، وعندما يكون مدخل انتخاب المعطيات (Low) يمر الدخل B إلى الخرج ويحجب A.

ولفهم آلية حدوث ذلك فكر باستخدام بوابة AND كبوابة تمكين.

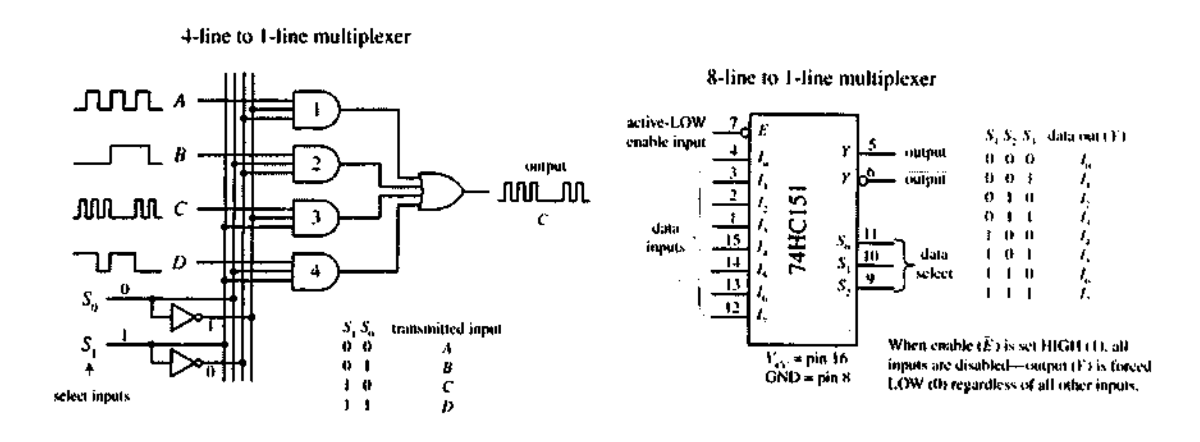
توجد أنواع مختلفة من نواخب المعطيات التي تتوفر كدارات متكاملة (ICs)، فالدارة 74157 مثلاً فيها (4) نواخب لكل واحد منها دخلين وتعمل الدارة كأربعة مفاتيح SPDT متحكم بها كهربائياً (أو إذا أردت كمفتاح 4PDT).

عندما توضع رجل الاختيار على حالة (high) فإن المداخل A_1، A_2، A_3 وA_4 تمر إلى المخارج Q_1، Q_2، Q_3 وQ_4 على الترتيب أما عندما يكون مدخل الانتخاب على الوضع (Low) فإن المداخل B_1، B_2، B_3 وB_4 هي التي تمر إلى المخارج Q_1، Q_2، Q_3 وQ_4 على الترتيب ويعتمد عمل الدارة في كلتا الحالتين على مدخل التمكين (Enable) فعندما يكون مدخل التمكين على حالة Low فإن المعطيات الموجودة على أطراف الدخل تمر إلى طرف الخرج، أما إذا كان طرف التمكين في حالة high فإن المعطيات تحجز في الدخل.



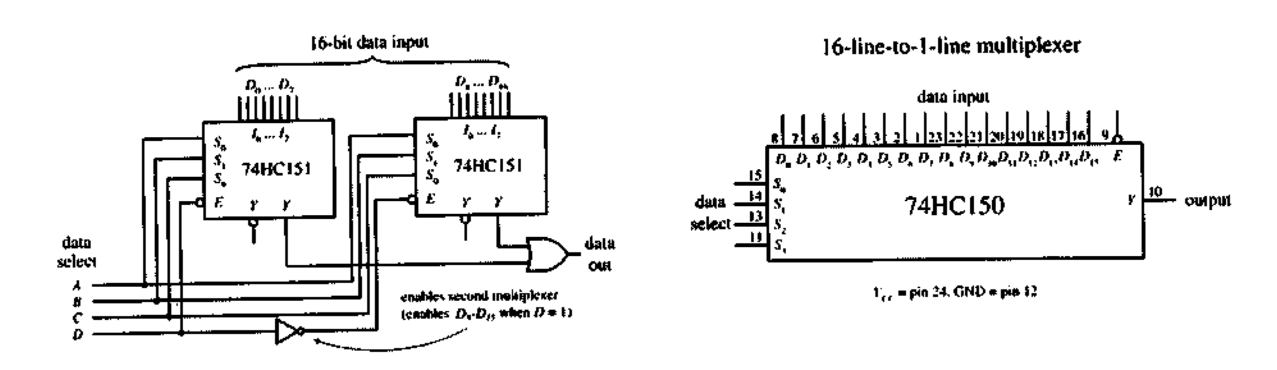
الشكل (32.12): أنواع مختلفة من نواخب المعطيات.

يسمى هذا النوع من التمكين باسم active low enable ومعنى ذلك أن مدخل التمكين يكون فعالاً إذا كان في حالة Low ويشار إلى ذلك بدائرة (bubble) على طرف التمكين. في بعض الحالات لا تُرسم الدائرة ويوضع خط فوق تسمية المدخل ($\overline{\text{Enable}}$) . وتستخدم الحالتان بنفس الدرجة للدلالة على التفعيل عند المستوى Low. يبيِّن الشكل (33.4) ناخباً له (4) خطوط في الدخل وخط واحد في الخرج باستخدام البوابات المنطقية وهذه الدارة تشبه دارة ناخب 1 من 2 المبينة في الشكل (12-32) ولكنها تحتاج إلى خط انتخاب إضافي لتأمين تشكيلات منطقية لأربعة عناوين.



الشكل (33.12): ناخب 1 من 4 ودارة متكاملة لناخب 1 من 8.

تتوفر دارات متكاملة كنواخب بعدد مختلف من خطوط الدخل. الدارة المتكاملة 74151 هي دارة ناخب 1 من 8 وفيها ثلاثة خطوط انتخاب (S_0، S_1، S_2) لاختيار واحدة من المداخل الثمانية (I_0 حتى I_7). للدارة 74151 خرجان أحدهما (true) الرجل (5) والآخر معكوس (الرجل 6)، وعندما يكون الخرج (true) أي الرجل (5) في حالة high وتوضع رجل التمكين (enable) على حالة (high) فإن الخرج (5) يصبح (Low) بغض النظر عن حالات المداخل. يمكن تشكيل دارة ناخب بعدد أكبر من المداخل عن طريق توصيل دارتي انتخاب مع بعض كما في الشكل (34.12) حيث تم وصل دارتي (74HC151) مع بعضهما لتشكيل ناخب (1) من (16) أو يمكن استخدام دارة متكاملة جاهزة (74HC150) تعمل كناخب (1) من (16). يمكنك البحث في الكتالوكات لمعرفة الأنواع الأخرى المتوفرة من دارات النواخب.



الشكل (34.12): دارة ناخب 1 من 16 مكونة من دارتين متكاملتين 74HC151، دارة متكاملة 74HC150 ناخب 1 من 16.

ستتعرف الآن على المفتاح ثنائي الحالة (bilateral switch)، وكمثال عليه الدارة المتكاملة (4066) المبينة في الشكل (32.12)، وهذه الدارة تعمل كمفتاح SPST وفيها (4) مفاتيح وتسمى بوابة نقل رباعية وتوجد مداخل تحكم للمفاتيح الأربعة تمكنك من اختيار حالة المفتاح (on) أو (off) ولكي تجعل أحد المفاتيح في حالة (on) طبق جهد (high) على مدخل التحكم الخاص به، ويكون المفتاح في حالة (off) إذا كان مدخل التحكم الخاص به على وضع (Low).

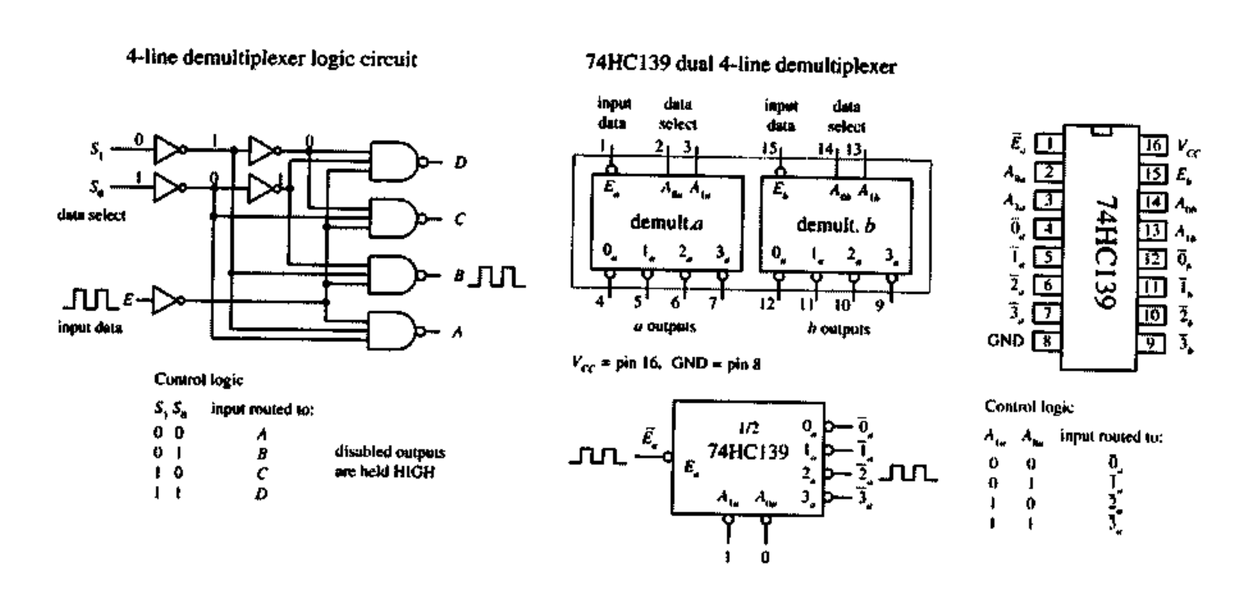
سوف نتعرف في هذا الفصل على مفاتيح تشابهيَّة وعلى نواخب تشابهيَّة وفيها تستخدم مداخل رقميَّة للتحكم بإشارات تشابهية. تعتبر المفاتيح والنواخب التشابهية هامة جداً عند ربط العالم الرقمي بالعالم التشابهي.

2.3.12 الموزعات والكواشف

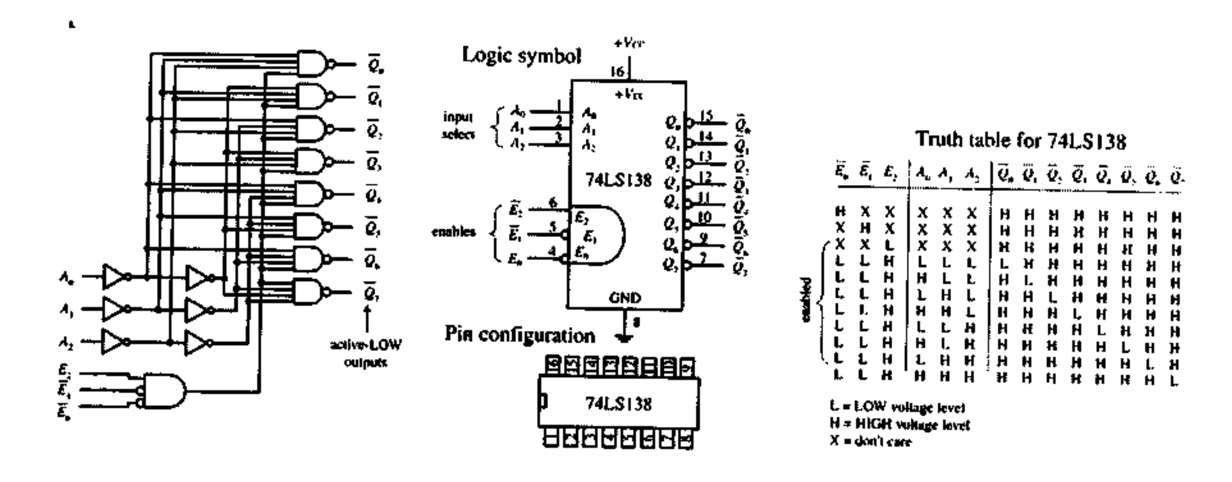
الموزع عكس الناخب، لأنه وحيد المدخل ويمكن أن يوصل هذا المدخل مع واحد فقط من مخارج متعددة في لحظة ما. تُعطى في الشكل (35.12) دارة موزع (1) إلى (5) مبني على بوابات منطقيَّة. يُطبق الدخل (E) على الدارة ويمكن إرسال هذا الدخل إلى أحد المحارف A، B، C أو D ويتم اختيار الخرج الذي يُرسل إليه الدخل بواسطة خطوط انتخاب S_0، S_1 كما هو مبيَّن في جدول الحقيقة الموجود تحت دارة الموزع في الشكل (35.12). المخارج غير المنتخبة تكون على حالة high أما المخرج المنتخب فيتغير وضعه حسب الدخل. الدارة المتكاملة 74HC139 الموجودة في الشكل (35.12) هي دارة موزع متكاملة تحوي بداخلها موزعين (1) إلى (4) مستقلين عن بعضهما، وإذا رغبة في دارة موزع ذات عدد أكبر من المخارج استخدم دارة متكاملة (74xx154) وهي موزع (1) إلى (6) ولها أربعة مداخل انتخاب لاختيار خرج واحد من (16) خرجاً ووصله مع الدخل. ابحث في الكتالوك الإلكتروني لمعرفة دارات الموزعات المتوفرة.

الكاشف (decoder) هو دارة منطقية تشبه إلى حدٍّ ما دارة الموزع ولكنه لا يوصل الدخل مع أحد المخارج باستخدام خطوط انتخاب، ولكنه يستخدم خطوط الانتخاب لاختيار أحد المخارج المتعددة وجعل حالته (high) أو (Low). يختلف عدد مداخل الانتخاب وعدد المخارج وحالة الخرج المنتخب (high) أو (Low) من ناخب إلى آخر. والسبب في توفر حالات مختلفة للخرج في الناخب هو التطبيق الذي سوف يُستخدم الناخب فيه.

وعلى سبيل المثال الناخب 74LS138 له ثلاثة مداخل انتخاب وثمانية مخارج ويمكن عن طريق خطوط الانتخاب وضع أحد المخارج في حالة (Low)، أما باقي المخارج الأخرى فتكون في حالة (high) وكما هي الحال في الموزع المبيَّن في الشكل (35.12) نسمي هذا الناخب (ناخباً بخرج فعَّال في حالة active Low-Low).



الشكل (35.12): دارات موزعات Demultiplexers



الشكل (36.12): شكل الدارة المتكاملة للكاشف 74LS138 وبنيته وجدول حقيقته.

ماذا يعني بالضبط قولنا إن الخرج فعال في حالة (Low) ــ active Low output؟

هذا يعني بالضبط أن الخرج المنتخب يجبر على أن يكون في حالة منطقية Low.

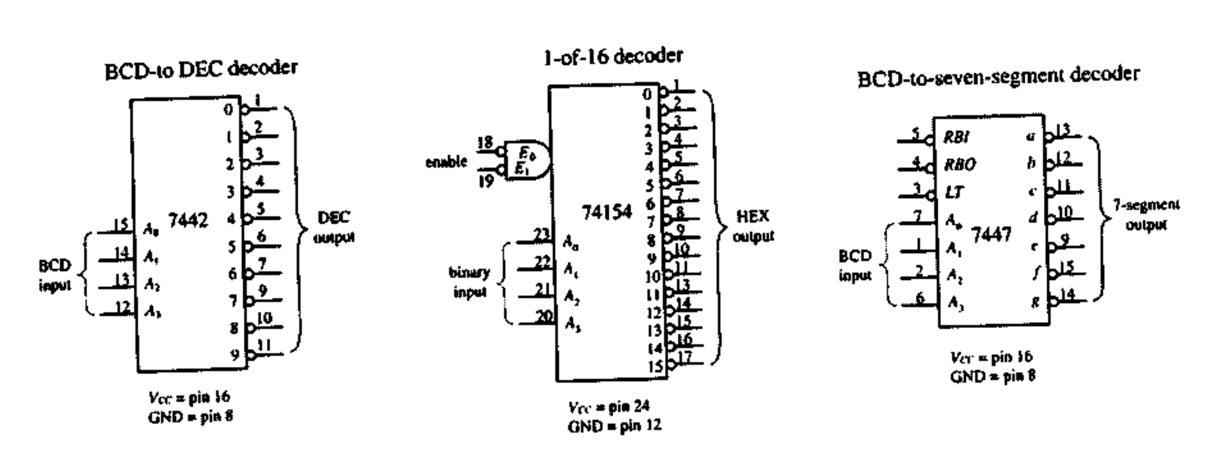
وإذا لم يكن هذا الخرج منتخباً فإنه يكون في حالة (high). الخرج الفعال في حالة high يكون تماماً بالعكس. يُشار عادة إلى الخرج الفعال Low بوضع دائرة على الخرج في رمز الدارة المنطقية، كما يُشار إليه أيضاً بوضع خط فوق الحرف الذي يرمز إلى الخرج مثل ($\overline{Q_0}$). أما المخارج الفعّالة high فلا توجد دائرة على طرف الخرج في رمز الدارة المتكاملة. المخارج الفعالة Low والفعالة high شائعة في الدارات المتكاملة. عند وصل ديود مصدر للضوء LED بين خرج فعال Low وموجب التغذية (+Vcc) فإن الديود يُضيء عند اختيار الخرج.

يُوصل ديود مثلاً بين خرج فعال high والأرض وعند انتخاب الخرج يمر تيار من الخرج إلى الديود إلى الأرض ويضيء الــ LED. هناك حدود للتيار الذي يمكن أن تمتصه الدارة المتكاملة أو تعطيه (تمتص الدارة المتكاملة تياراً (sink current)

عند وصل ديود LED بين Vcc+ وخرج فعال Low وانتخاب الخرج وتصدر الدارة تياراً (source current) عند وصل LED بين خرج فعال high والأرض وانتخاب الخرج). سوف نناقش حدود التيارات المسموحة في الدارات المتكاملة في الفقرة (4.12) وسنقدم مخططات لدارات مستخدمة لقيادة أحمال تشابهية في الفقرة (10.12).

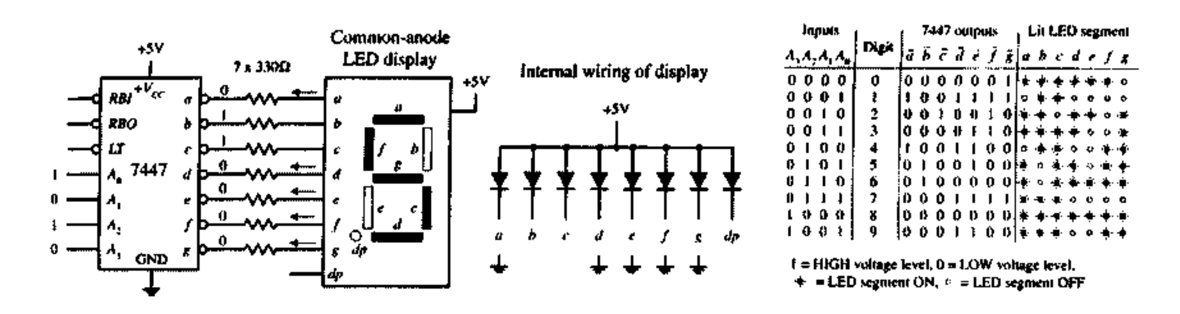
نعود الآن إلى دارة الكاشف 74LS138 ونناقش مداخل التمكين المتبقية ($\overline{E}_0$ ، $\overline{E}_1$ ، E_2). كي يعمل الكاشف 74LS138 يجب وضع المداخل $\overline{E}_0$ و $\overline{E}_1$ الفعالة Low في حالة Low والمدخل E_2 في حالة high، وإذا اخترت أية تشكيلة أخرى لهذه المداخل فإن الكاشف يكون غير مفعَّل (disabled)، وتكون كافة المخارج في حالة (high) بغض النظر عن المداخل المنتخبة.

يتوفر في الأسواق كاشف آخر شائع الاستخدام هو 7442 BCD-to-DEC، وهو عبارة عن كاشف من (BCD) إلى عشري (decimal)، والكاشف 74154 وهو عبارة عن كاشف (1) من (16) والخرج بنظام (HEX). إضافة إلى ذلك يتوفر الكاشف 7447 من BCD إلى إظهار سباعي القطع، ويبيِّن الشكل (37.12) رموز الدارات التكاملية لهذه الكواشف. كل هذه الكواشف لها مخارج فعالة Low. يستخدم دخل بنظام BCD في الكاشف 7442 لانتخاب (1) من (10) مخارج مرقمة من (0) إلى (9)، أما في الكاشف 74154 فيستخدم دخل ثنائي بأربع خانات لعنونة (1) من (16) خرج مرقمة من (0) إلى (15) وبانتخاب أحد المخارج يجبر الخرج على حالة (Low)، (وكافة المخارج الباقية تكون في حالة (high)، وذلك بفرض أنَّ مداخل التمكين (2) في حالة Low.



الشكل (37.12): رموز الكواشف 7442، 74154 و7447.

يختلف الكاشف 7447 قليلاً عن الكواشف الأخرى، وفي هذا الكاشف يمكن قيادة أكثر من خرج إلى حالة (Low) في وقت واحد، وهذا هام جداً لأنه يسمح للكاشف 7447 بقيادة وحدات الإظهار سباعية القطع، لأن تشكيل الأرقام يحتاج إلى قيادة أكثر من قطاع LED في نفس الوقت، فمثلاً وكما في الشكل (38.12) وعند تطبيق الرقم (5) بنظام BCD أي (0101) على مداخل الكاشف 7447 فإن كافة المخارج ماعدا ($\overline{b}$) و($\overline{c}$) تكون في حالة Low، وهذا يجعل ديودات LEDs القطاعات a، d، e، f وg تُضيء، وتمتص الدارة 7447 تيارات عبر (LED) ديودات القطاعات في وحدة الإظهار ويظهر ذلك من جدول الحقيقة ومن التوصيل الداخلي لوحدة الإظهار.



Inputs $A_3 A_2 A_1 A_0$	Digit	7447 outputs $\bar{a}$ $\bar{b}$ $\bar{c}$ $\bar{d}$ $\bar{e}$ $\bar{f}$ $\bar{g}$	Lit LED segment a b c d e f g
0 0 0 0	0	0 0 0 0 0 0 1	✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ○
0 0 0 1	1	1 0 0 1 1 1 1	○ ✱ ✱ ○ ○ ○ ○
0 0 1 0	2	0 0 1 0 0 1 0	✱ ✱ ○ ✱ ✱ ○ ✱
0 0 1 1	3	0 0 0 0 1 1 0	✱ ✱ ✱ ✱ ○ ○ ✱
0 1 0 0	4	1 0 0 1 1 0 0	○ ✱ ✱ ○ ○ ✱ ✱
0 1 0 1	5	0 1 0 0 1 0 0	✱ ○ ✱ ✱ ○ ✱ ✱
0 1 1 0	6	0 1 0 0 0 0 0	✱ ○ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱
0 1 1 1	7	0 0 0 1 1 1 1	✱ ✱ ✱ ○ ○ ○ ○
1 0 0 0	8	0 0 0 0 0 0 0	✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱
1 0 0 1	9	0 0 0 1 1 0 0	✱ ✱ ✱ ○ ○ ✱ ✱

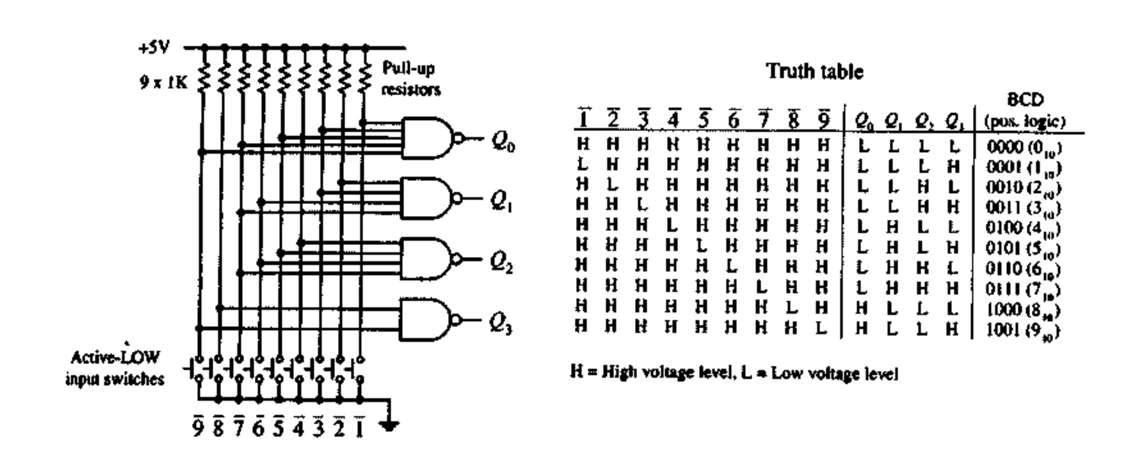
1 = HIGH voltage level, 0 = LOW voltage level.
✱ = LED segment ON, ○ = LED segment OFF

الشكل (38.12): كاشف 7447 موصول مع وحدة إظهار سباعية القطع.

للكاشف 7447 مدخل يسمى test active low input ويرمز له بالرمز ($\overline{LT}$) أي مدخل اختبار فعال في حالة Low ويمكن استخدام هذا المدخل لقيادة كافة ديودات (LEDs) القطاعات في آن واحد لمعرفة فيما إذا كان ديود (LED) أحد القطاعات معطلاً. يمكن استخدام المدخل ($\overline{RBI}$) و ($\overline{RBO}$) في تطبيقات الإظّهار متعدد المراحل لكبت الأصفار في بدايات الأرقام ونهاياتها، فمثلاً في إظهار ثماني الخانات للرقم (0056.020) يمكن كبت الصفرين اليساريين والصفر اليميني النهائي وإظهار (56.02) يكبت الصفر اليساري (Leading-edge zero) بوصل ($\overline{RBO}$) للكاشف إلى ($\overline{RBI}$) لكاشف المرحلة التالية، أما ($\overline{RBI}$) لكاشف الخانة الأكثر أهمية من الرقم فيوصل مع الأرض، ويستخدم نفس الإجراء لتأمين كبت آلي لآخر صفر في القسم الواقع بعد الفاصلة في الرقم.

3.3.12 المرمزات والمبدلات (مبدلات الشيفرة)

المرمزات هي عكس الكواشف، وتستخدم لتشكيل خرج مرمَّز (Coded Output) من دخل عددي فعال وحيد، ولتوضيح ذلك بأسلوب بسيط ندرس المرمز من عشري (decimal) إلى BCD، المبيَّن في الشكل (39.12).



$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$	$\bar{4}$	$\bar{5}$	$\bar{6}$	$\bar{7}$	$\bar{8}$	$\bar{9}$	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3	BCD (pos. logic)
H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	L	L	L	$0000\ (0_{10})$
L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	L	L	H	$0001\ (1_{10})$
H	L	H	H	H	H	H	H	H	L	L	H	L	$0010\ (2_{10})$
H	H	L	H	H	H	H	H	H	L	L	H	H	$0011\ (3_{10})$
H	H	H	L	H	H	H	H	H	L	H	L	L	$0100\ (4_{10})$
H	H	H	H	L	H	H	H	H	L	H	L	H	$0101\ (5_{10})$
H	H	H	H	H	L	H	H	H	L	H	H	L	$0110\ (6_{10})$
H	H	H	H	H	H	L	H	H	L	H	H	H	$0111\ (7_{10})$
H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	L	L	L	$1000\ (8_{10})$
H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	L	L	H	$1001\ (9_{10})$

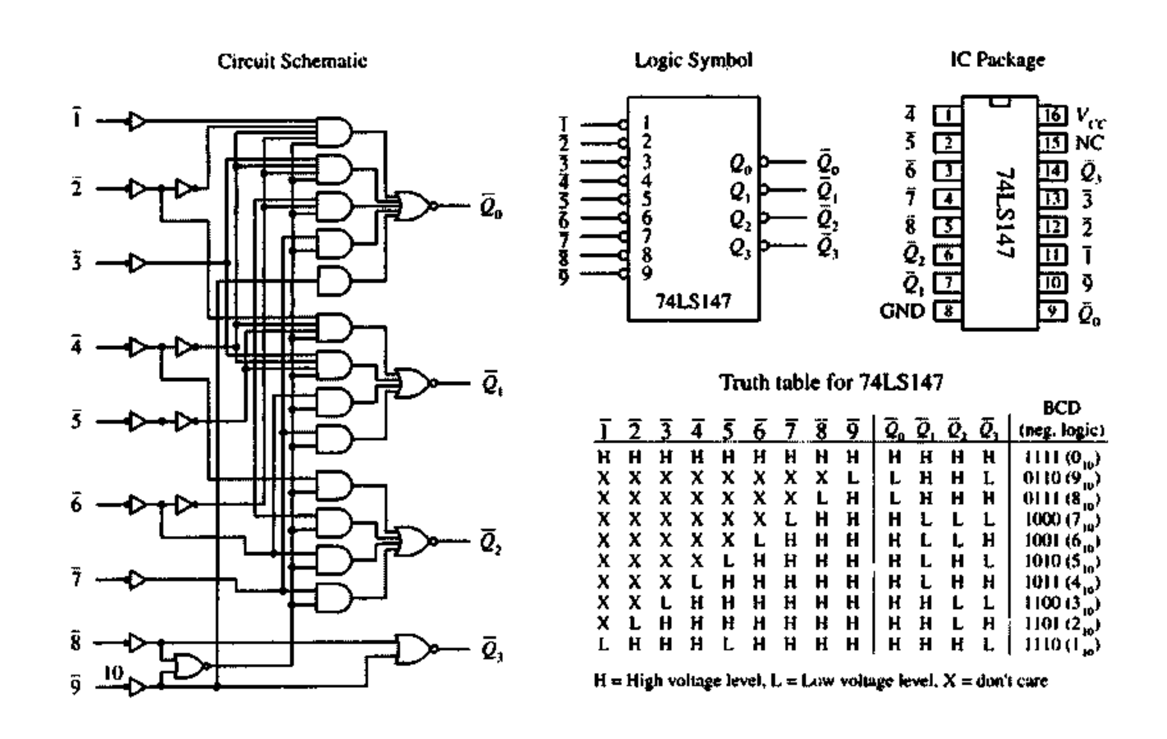
H = High voltage level, L = Low voltage level

الشكل (39.12): دارة مرمز من عشري (decimal) إلى BCD.

تُوصل كافة الخطوط في طرف مداخل البوابات إلى (V 5 +) عن طريق مقاومات شد (pull-up resistors)، ومن أجل توليد خرج BCD موافق لرقم عشري وحيد في الدخل يُغلق المفتاح الموافق لذلك الرقم (يعمل المفتاح كدخل فعال Low) ويشرح جدول الحقيقة المبيَّن في الشكل كيفية عمل الدارة.

يبيِّن الشكل (40.12) الدارة المتكاملة 74LS147 وهي دارة مرمِّز من عشري إلى BCD أي من عشر خطوط إلى (4) خطوط (10 lines -to- 4 lines) تقوم الدارة 74LS147 بنفس عمل الدارة (39.12) ولكن مخارجها فعالة Low وهذا يعني أنه وبدلاً من الحصول في الدارة (39.12) على الخرج (LLHH) عند اختيار الرقم (3) فإننا نحصل هنا على (HHLL).

والخرجان في الحالتين يمثلان الرقم (3) الأول ممثلاً بمنطق positive-true logic والثاني (74LS147) بنمط (negative true logic). إذا كنت لا تُحب المنطق negative true logic بإمكانك وصل عواكس مع مخارج الدارة المتكاملة (74LS147)، وطبعاً يتعلق استخدام منطق (active Low) أو (active high) بالدارة التي تريد قيادتها من مخارج المرمزات، فمثلاً المخارج الفعالة Low مناسبة لقيادة مداخل فعالة (Low).



Truth table for 74LS147

$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$	$\bar{4}$	$\bar{5}$	$\bar{6}$	$\bar{7}$	$\bar{8}$	$\bar{9}$	$\bar{Q}_0$	$\bar{Q}_1$	$\bar{Q}_2$	$\bar{Q}_3$	BCD (neg. logic)
H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	1111 (0_{10})
X	X	X	X	X	X	X	X	L	L	H	H	L	0110 (9_{10})
X	X	X	X	X	X	X	L	H	L	H	H	H	0111 (8_{10})
X	X	X	X	X	X	L	H	H	H	L	L	L	1000 (7_{10})
X	X	X	X	X	L	H	H	H	H	L	L	H	1001 (6_{10})
X	X	X	X	L	H	H	H	H	H	L	H	L	1010 (5_{10})
X	X	X	L	H	H	H	H	H	H	L	H	H	1011 (4_{10})
X	X	L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	L	1100 (3_{10})
X	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	1101 (2_{10})
L	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	L	1110 (1_{10})

H = High voltage level, L = Low voltage level, X = don't care

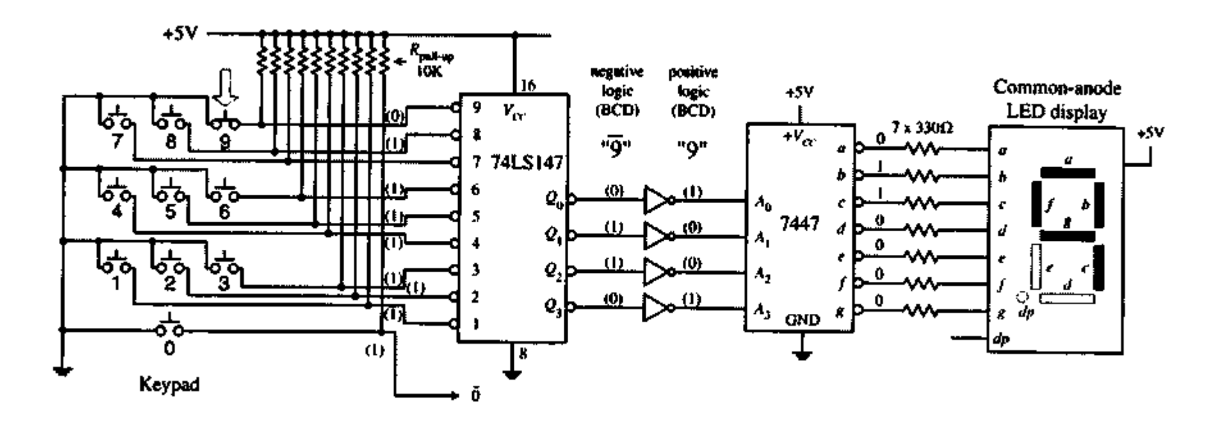
الشكل (40.12): رمز دارة المرمز 74LS147 ومخطط دارته وشكل دارته مع جدول الحقيقة الخاص به.

هناك فارق هام آخر بين دارة المرمِّز المعطى في الشكل (39.12) والمرمِّز المتكامل 74LS147 وهو عبارة priority (أفضلية) فالمرمز 74LS147 يُسمى (decimal to 4-bit BCD priority encoder)، وكلمة priority تعني عند استخدام المرمِّز 74LS147 وعند ضغط عدة مفاتيح دخل مع بعض فإن المرمِّز يختار مفتاح الدخل المقابل للرقم العشري الأعلى أهمية. مثلاً لو تم الضغط في آن واحد على مفاتيح الأرقام 3، 5 و8 فإن الرقم (8) وحده هو الذي يحوَّل إلى BCD في الخرج فيظهر في الخرج الفعال Low (0111 أو LHHH).

ويوضح جدول الحقيقة في الشكل (40.12) هذه الميزة ــ انظر إلى حالات x (don't care) في جدول الحقيقة. في المرمزات التي لا تملك هذه الميزة (no priority encoders)، إذا تم ضغط عدة مداخل مع بعض لا يمكن التنبؤ بالخرج.

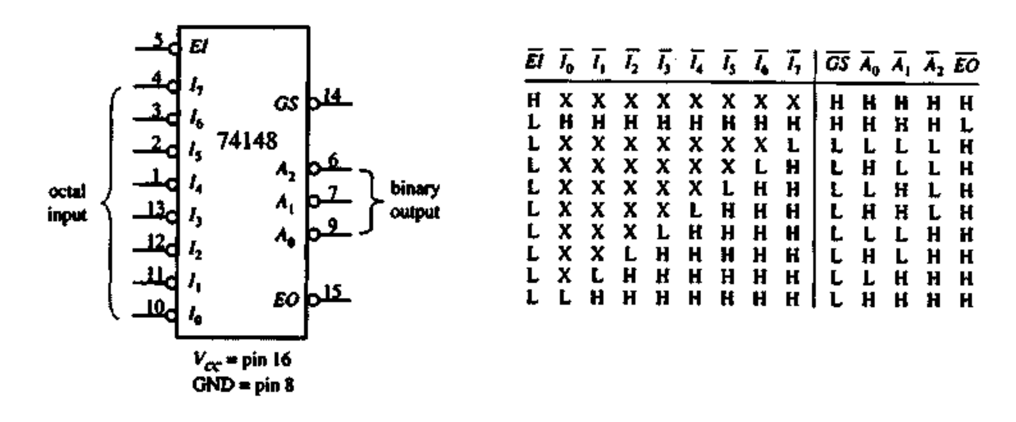
يبيِّن الشكل (12-41) استخدام مرمز (encoder) وكاشف (فاك ترميز) لقيادة وحدة إظهار عن طريق لوحة أرقام من 0- وحتى 9، وفي هذه الدارة ترمِّز الدارة المتكاملة 74LS147 المداخل العشرية إلى BCD (منطق سالب negative logic). توصل أربعة عواكس مع مخارج المرمز لتحويل الـــ BCD إلى منطق موجب.

وتُطبق مخارج العواكس على كاشف إظهار 7447 من BCD إلى إظهار سباعي القطع (seven-segment LED display).



الشكل (41.12): استخدام مرمِّز وكاشف لقيادة وحدة إظهار.

يبيِّن الشكل (42.12) مرمِّز أفضلية من ثماني (octal) إلى ثنائي (binary) والمرمِّز هو 74148 وتستخدم هذه الدارة التكاملية لتحويل دخل ثماني محدَّد وحيد إلى شيفرة خرج ثنائية بثلاث خانات. وهنا أيضاً عند اختيار عدة مفاتيح دخل في آن واحد فإن العدد الأعلى هو الذي يظهر في الخرج بالنظام الثنائي.

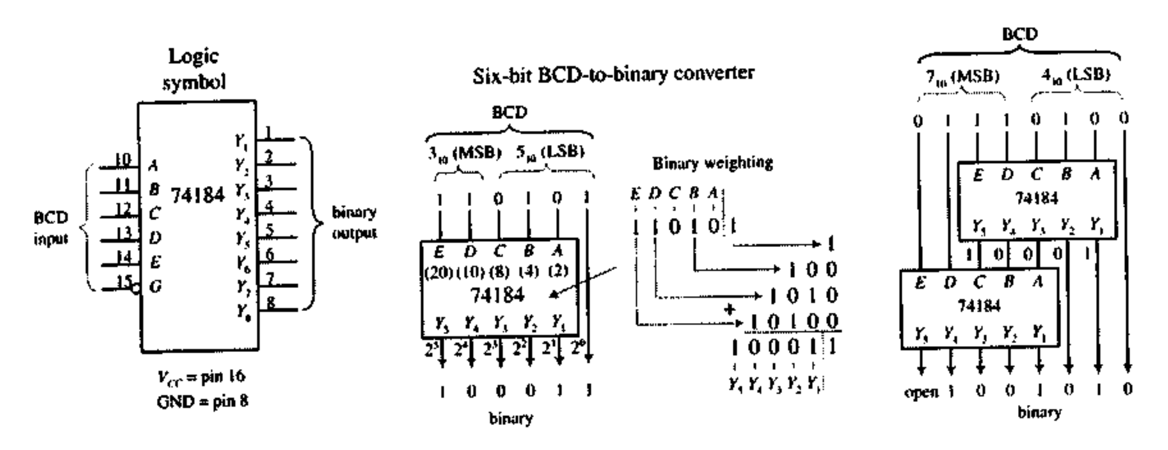


$\overline{EI}$	$\overline{I_0}$	$\overline{I_1}$	$\overline{I_2}$	$\overline{I_3}$	$\overline{I_4}$	$\overline{I_5}$	$\overline{I_6}$	$\overline{I_7}$	$\overline{GS}$	$\overline{A_0}$	$\overline{A_1}$	$\overline{A_2}$	$\overline{EO}$
H	X	X	X	X	X	X	X	X	H	H	H	H	H
L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L
L	X	X	X	X	X	X	X	L	L	L	L	L	H
L	X	X	X	X	X	X	L	H	L	H	L	L	H
L	X	X	X	X	X	L	H	H	L	L	H	L	H
L	X	X	X	X	L	H	H	H	L	H	H	L	H
L	X	X	X	L	H	H	H	H	L	L	L	H	H
L	X	X	L	H	H	H	H	H	L	H	L	H	H
L	X	L	H	H	H	H	H	H	L	L	H	H	H
L	L	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H

الشكل (42.12): كاشف الأفضليّة 74148 من ثماني إلى ثنائي.

عند تطبيق high على مدخل التمكين ($\overline{EI}$) تُجبر كافة المداخل على الانتقال إلى حالة (high) غير الفعالة ويمكن في هذه الأثناء تطبيق معطيات على الدخل وتستقر هذه المعطيات على وضعها النهائي دون أن يتأثر الخرج. تتوفر في هذه الدارة المتكاملة أرجل ($\overline{GS}$) إشارة خرج المجموعة (group signal output) وإشارة تمكين الخرج (enable output) للسماح بتوسيع النظام. الخرج $\overline{GS}$ يكون فعالاً (Low) عندما يكون أي من المداخل في حالة فعال (Low). يكون الخرج ($\overline{EO}$) فعالاً (Low) عندما تكون كافة المداخل في حالة (high). إن ($\overline{EO}$) و($\overline{GS}$) تكون فعالة (high) عندما يكون ($\overline{EI}$) في حالة (high) والدارة غير مفعَّلة (device disabled).

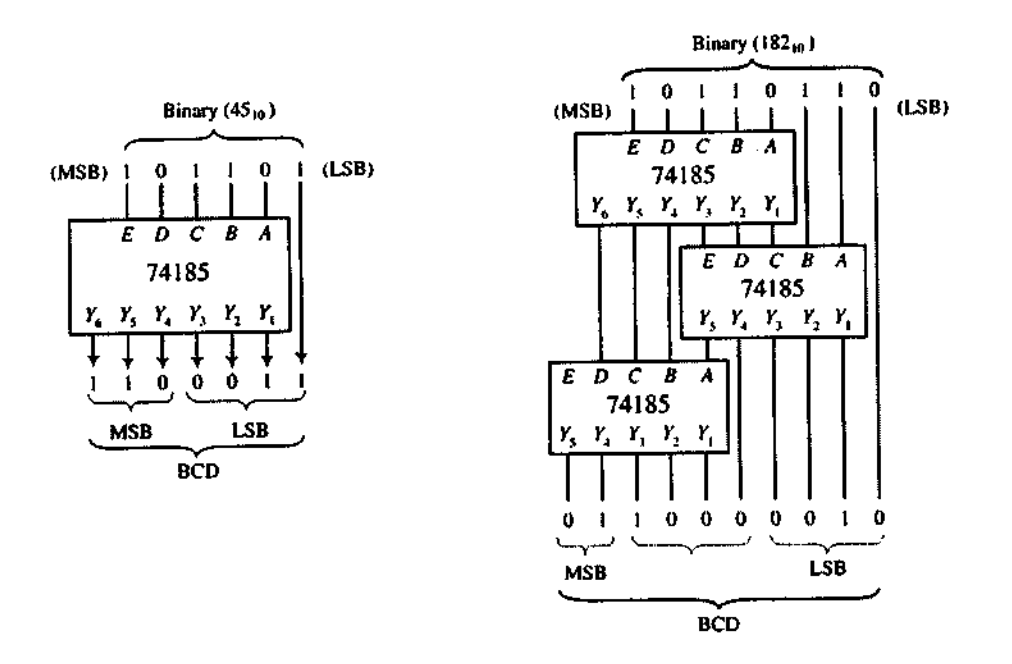
يبيِّن الشكل (43.12) مبدِّل شيفرة (مرمِّزاً) 74184 من BCD إلى ثنائي، ولهذه الدارة المتكاملة ثمانية مخارج فعالة (high) ويُرمز لها بـ (Y1) حتى (Y8). المخارج (Y1) إلى (Y5) هي مخارج نظاميّة لمبدِّل BCD إلى ثنائي نظامي (regular)، أما المخارج (Y6) إلى (Y8) فإنها تستخدم لشيفرة BCD الخاصة التي تسمى nine's complement المتمم التاسع والمتمم العاشر ten's complement. يُطبق كود BCD الفعال high على المداخل A، B، C، D، E. الدخل $\overline{G}$ هو مدخل تمكين فعال Low.



الشكل (43.12): مبدّل شيفرة 74185 من BCD إلى ثنائي.

يبيِّن الشكل (43.12) مبدل شيفرة من BCD إلى ثنائي 6 bit ومبدِّل شيفرة 8-bit من BCD إلى ثنائي ويستخدم الدارة المتكاملة 74184 الموضحة في الطرف اليميني من الشكل. في دارة المبدل 6-bit وبما أن خانة الـ (LSB) من شيفرة الـ BCD تساوي دوماً خانة الـ LSB من شيفرة الثنائي فإن الوصل قد تم مباشرة من الدخل إلى الخرج، أما باقي خانات شيفرة الـ BCD فتطبق على المداخل A حتى E. إن عامل الوزن (weighting factor) الثنائي لكل دخل هو A = 2، B = 4، C = 8، D = 10، E = 20. وبسبب توفر خانتين فقط للرقم الأكثر أهمية من شيفرة الـ BCD (MSD-BCD)، فإن أكبر رقم BCD في ذلك الموضع سيكون 3 (11 بالثنائي). من أجل الحصول على مبدِّل 8-bit BCD كامل يجب أن توصل دارتا 74184 مع بعضهما كما في الشكل اليميني.

يُعطى في الشكل (44.12) المرمِّز (مبدِّل شيفرة) 74185 وهو مشابه للمرمِّز 74184 ولكن بالعكس وفي الشكل تجد أيضاً توصيلتين الأولى لمبدِّل 6-bit من BCD إلى ثنائي والثاني مبدِّل 8-bit أيضاً من ثنائي إلى BCD.



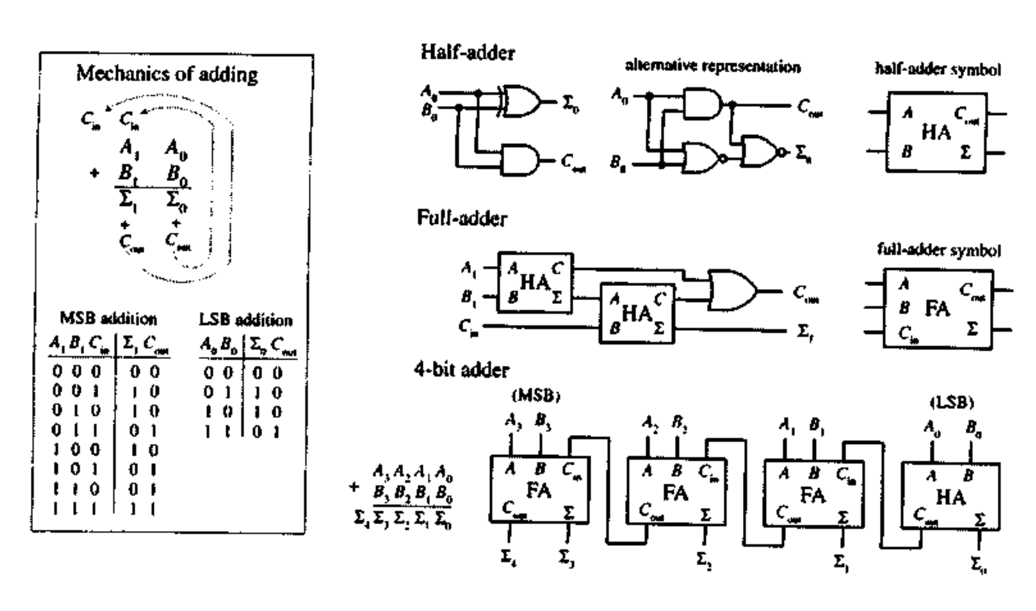
الشكل (44.12): المبدّل 74185.

4.3.12 دارات الجمع الثنائي

يمكن بناء دارة تقوم بجمع الأعداد الثنائية باستخدام عدة بوابات منطقيّة وآلية جمع الأعداد الثنائية تشبه الجمع في النظام العشري، حيث تكتب الأرقام الثنائية فوق بعضها مثلاً وتبدأ عملية الجمع من العمود اليميني وتجمع الخانات مع بعضها وعندما يكون ناتج جمع خانتين عموديتين مع بعض يساوي العدد (2) فإنك تضع (0) وتنقل (1) إلى العمود التالي ويسمى هذا الواحد بالواحد المحمول فمثلاً:

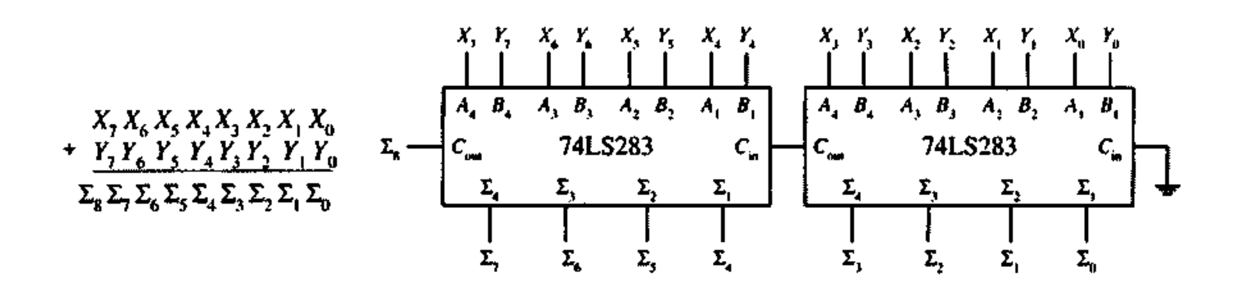
(10 = 1 + 1 ونكتبها 0 ومحمول يساوي 1). إذا كان عدد أرقام الأعداد التي تجمع مع بعضها كثيراً تكون هناك عمليات حمل متعددة.

ولتوضيح كيفية استخدام البوابات لإنجاز عملية الجمع ابدأ بدارة الجامع النصفي (half adder) المبينة في الشكل (45.12). إن دارتي الجامع النصفي المبينتين في الشكل متكافئتان وفي إحداهما تستخدم بوابة XOR وبوابة AND وفي الأخرى تستخدم بوابة AND وبوابتا NOR. يستطيع الجامع النصفي جمع عددين كل واحد منهما مكون من (bit) واحدة ويكون ناتج الجمع عدداً مكوَّناً من خانتين. يُرمز لخانة الـــ LSB في ناتج الجمع بالرمز (Σ_0) ولخانة الـــ MSB أو المحمول (carry) بالرمز C_{out}.



الشكل (45.12): دارات جمع ثنائي.

إن أعقد عملية يستطيع الجامع النصفي إنجازها هي (1 + 1)، ولكي تتمكن من جمع عددين كل واحد منهما مكوَّن من خانتين لابد من استخدام دارة الجامع الكامل (full adder) المبينة في الشكل (45.12) ووصلها مع خرج دارة الجامع النصفي. للجامع الكامل ثلاثة مداخل، اثنان منها لتطبيق الخانات التالية من الرقمين المطلوب جمعهما (A_1، B_1) والمدخل الثالث لوصل المحمول (C_{arry}) من دارة الجامع النصفي (الدارة التي تجمع A_0 مع B_0) وفي خرج الجامع الكامل نحصل على (Σ_1) وهي حاصل جمع الخانتين التاليتين (A_1 وB_1) من الأعداد الثنائية والخرج الآخر هو المحمول C_{out} الذي يعتبر بمثابة الخانة الثالثة. يمكن بإضافة دارات جامع كامل متتالية الحصول على دارة جمع نهائية لعددين متعددي الخانات، ويوصل المحمول من الجامع النصفي (C_{in}) من الجامع الكامل التالي و(C_{out}) من الجامع الكامل مع (C_{in}) للجامع الكامل الذي يليه وهكذا. يبيِّن الشكل (45.12) في الأسفل دارة كاملة لجمع عددين كل واحد منهما مكون من أربع خانات (A_3 A_2 A_1 A_0) و(B_3 B_2 B_1 B_0). تتوفر دارات متكاملة ICs لجمع عددين بـــ (4) خانات كالدارة 74LS283 و4008 ولهذه الدارات مدخل Carry إضافي (C_{in}) وخرج محمول Output Carry ولذلك يمكن وصل هذه الدارات مع بعض لتكوين جامع 8-bit أو 12-bit أو 16-bit ... إلخ. يبيِّن الشكل (46.12) جامع 8-bit مكونا من دارتي 74LS283.

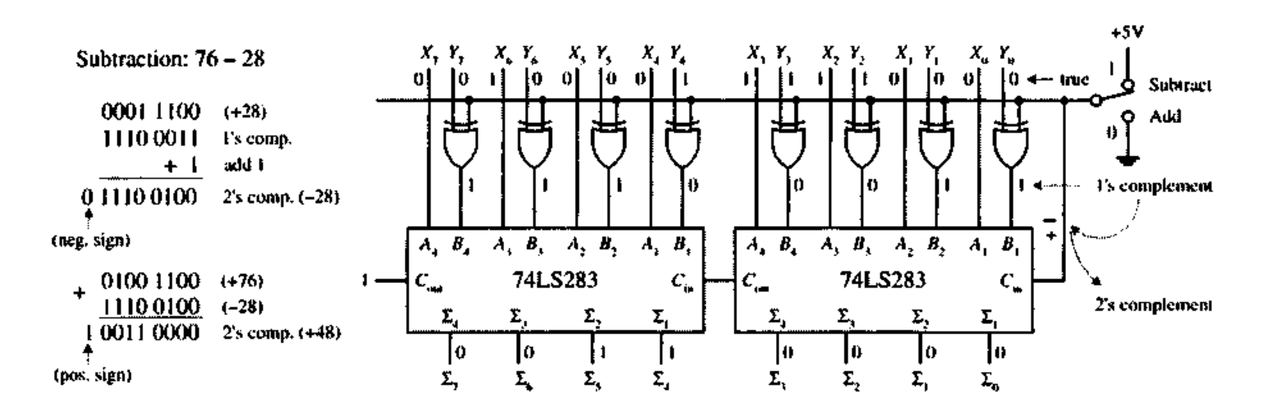


الشكل (46.12): دارة جامع 8-bit.

5.3.12 جامع/طارح ثنائي

يبيِّن الشكل (47.12) كيفية وصل جامعين 4-bit نوع 74LS283 مع مصفوفة من بوابات XOR لتكوين جامع 8-bit /طارح متمم ثاني 8-bit. يطبق العدد الأول (X) على المداخل (X_0) حتى (X_7)، أما الرقم الثاني (Y) فيطبق على المداخل (Y_0) حتى (Y_7). عند الرغبة في جمع العدد (X) مع العدد (Y) يوضع مفتاح الجمع/طرح على وضعية جمع (Add) وبذلك يصبح أحد مداخل كافة بوابات XOR صفراً (0) وبذلك تصبح بوابات XOR شفافة أي يمر الدخل الثاني لبوابة XOR إلى الخرج فتمر خانات العدد (X) إلى المداخل (A) وخانات العدد (Y) إلى المداخل B. يُجمع العددان في دارة الجامع 8-bit وتظهر النتيجة على المخارج (Σ). لطرح (Y) من (X) يجب أولاً إيجاد المتمم الثنائي الثاني للعدد (Y) ثم يجمع (X) مع المتمم الثنائي الثاني للعدد (Y) فنحصل على (X-Y)، ولذلك يوضع مفتاح الجمع/طرح على الوضع طرح (subtract) فيطبق (1) على أحد مداخل كل بوابة من بوابات XOR وهذا يجعل خانة العدد (Y) المطبقة على المداخل الأخرى لبوابات XOR تظهر معكوسة في الخرج وبذلك نكون قد أخذنا المتمم الثنائي الأول للعدد (Y) ويُطبق هذا المتمم على الخانات B في دارة الجامع 8-bit وبنفس الوقت يوضع مدخل الـ Carry (C_{in}) للجامع 74LS283 اليساري على حالة (1) وبذلك يُضاف (1) إلى المتمم الثنائي الأول للعدد (Y) ويتشكل المتمم الثاني (2's complement).

يتولى الجامع 8-bit عملية جمع العدد (X) مع المتمم الثنائي الثاني للعدد (Y) ونحصل على الخرج في الطرف السفلي (انظر الشكل) للجامع. يُرمز لمخارج الجامع بالرموز Σ_0، Σ_1 ... حتى Σ_7. في الشكل يطرح العد (28) من العدد 76.



الشكل (47.12): دارة جامع/طارح ـ 8 bit.

6.3.12 وحدات الحساب والمنطق

إنّ وحدة الحساب والمنطق (ALU) هي دارة متكاملة متعددة الاستخدامات قادرة على إنجاز مختلف العمليات الحسابية والمنطقيّة.

ومن أجل اختيار عملية ما لإنجازها يُطبق كود (شيفرة) ثنائي على مداخل انتخاب النمط (mode select inputs) في الدارة المتكاملة.

الدارة المتكاملة 74181 المبينة في الشكل (48.12) هي دارة ALU لـــ 4-bit وتنجز هذه الدارة (16) عملية منطقية و(16) عملية حسابيّة.

يوضع مدخل التحكم بالنمط (M) للدارة 74181 على حالة (Low) لاختيار عملية حسابيَّة، أما عند الرغبة في اختيار عملية منطقيَّة فيوضع هذا المدخل على حالة (high) وبعد اختيار نوع العملية المطلوب (حسابية أو منطقية) يُطبق كود مكون من 4 خانات (S_0، S_1، S_2، S_3) على مداخل اختيار النمط لتحديد العملية المطلوبة. إذا اخترت $S_0 = 0$، $S_1 = 1$، $S_2 = 1$؛ $S_3 = 1$ و$M = 1$ فإنك تحصل على:

$F_0 = A_0 + B_0, F_1 = A_1 + B_1 ; F_2 = A_2 + B_2 ; F_3 = A_3 + B_3$

وإشارة (+) الواردة هنا لا تمثل عملية جمع، وإنما تمثل عملية OR المنطقيَّة، أما في عملية الجمع فتستخدم كلمة (plus). توجد أرجل Carry-in (C_{in}) وهي خاصة بالاستخدام في العمليات الحسابيّة.

إن كافة النتائج الحسابية التي تعطيها هذه الوحدة هي بالتدوين المتمم الثنائي الثاني (2's complement).

Mode select				Logic functions	Arithmetic operations
S_3	S_2	S_1	S_0	$(M = 1)$	$(M = 0, \overline{C}_n = 1)$
0	0	0	0	$F = \overline{A}$	$F = A$
0	0	0	1	$F = \overline{A + B}$	$F = A + B$
0	0	1	0	$F = \overline{A}B$	$F = A + \overline{B}$
0	0	1	1	$F = 0$	$F =$ minus 1 (2's comp.)
0	1	0	0	$F = \overline{AB}$	$F = A$ plus $A\overline{B}$
0	1	0	1	$F = \overline{B}$	$F = (A + B)$ plus $A\overline{B}$
0	1	1	0	$F = A \oplus B$	$F = A$ minus B minus 1
0	1	1	1	$F = A\overline{B}$	$F = A\overline{B}$ minus 1
1	0	0	0	$F = \overline{A} + B$	$F = A$ plus AB
1	0	0	1	$F = \overline{A \oplus B}$	$F = A$ plus B
1	0	1	0	$F = B$	$F = (A + \overline{B})$ plus AB
1	0	1	1	$F = AB$	$F = AB$ minus 1
1	1	0	0	$F = 1$	$F = A$ plus A
1	1	0	1	$F = A + B$	$F = (A + B)$ plus A
1	1	1	0	$F = A + B$	$F = (A + \overline{B})$ plus A
1	1	1	1	$F = A$	$F = A$ minus 1

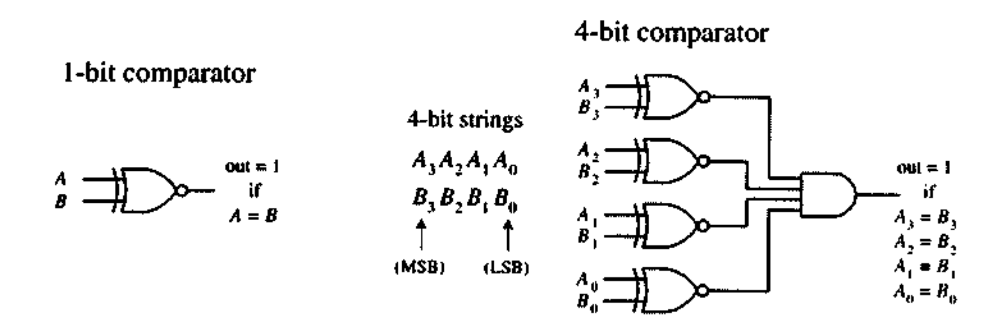
الشكل (48.12): وحدة حساب ومنطق.

7.3.12 الدارات المتكاملة التي تعمل كمقارنات/مقارنات قيمة

المقارن المنطقي هو دارة يُطبق عليها عددان ثنائيان وتقرر هذه الدارة فيما إذا كان العددان متساويين أم لا. تعطى في الشكل (49.12) بوابة XNOR تعمل كمقارن لعددين كل واحد منهما مكون من خانة واحدة. كما توجد في الشكل دارة مقارن لعددين (4 bit). يعطى مقارن الـــ 1 bit خرجاً في حالة high أو (1) فقط إذا كان العددان A وB متساويين (A وB عددان كل واحد منهما مكون من خانة واحدة). إذا كان A لا يساوي B يكون خرج المقارن Low. يمكن اعتبار مقارن الـــ 4 bit أربعة مقارنات (1-bit) مجمَّعة مع بعضها. إذا كانت كافة خانات العددين متساوية، أي:

$(A_0 = B_0) ; (A_1 = B_1) ; (A_2 = B_2) ; (A_3 = B_3)$

فإن مخارج بوابات XNOR تكون كلها واحدات (1) ويكون خرج بوابة AND في حالة (1)، أما إذا كان هناك عدم تساوٍ في إحدى الخانات، مثلاً $A_2 \neq B_2$ عندها ينقلب خرج بوابة AND إلى (0) أو Low.



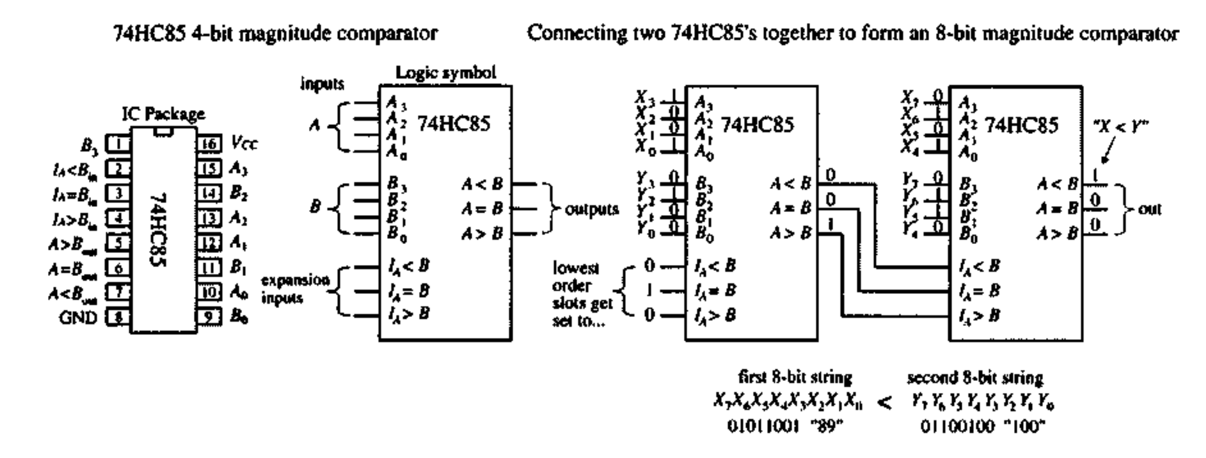
الشكل (49.12): مقارنات 1 bit و4-bit.

إذا أردت أن تعرف أي عدد أكبر A أم B، فإن الدارة (49.12) لا يمكن أن تعطيك هذا الجواب، وتحتاج في هذه الحالة إلى مقارن قيمة (magnitude comparator)، كالمقارن 74HC85 المبيَّن في الشكل (50.12)، وهذه الدارة لا تخبرك فقط بأن العددين متساويان، وإنما تخبرك أي العددين أكبر.

إذا طبقت العدد (9_{10}) 1001 على المداخل A_3 A_2 A_1 A_0 والعدد (12_{10}) 1100 على المداخل B_3 B_2 B_1 B_0، فإن الخرج $A < B$ يكون high (باقي المخارج $A > B$ و$A = B$ تبقى في حالة Low). إذا كان $A = B$ فإن الخرج $A = B$ يصبح في حالة high وهكذا. إذا أردت مقارنة أعداد 8-bit عليك وصل دارتين متكاملتين 74HC85 مع بعضهما كما في الشكل اليميني (50.12).

يقوم المقارن اليساري بمقارنة الخانات الأربع الأقل أهمية من العدد الأول مع الخانات الأربع الأقل أهمية من العدد الثاني، أما المقارن اليميني فيقارن الخانات الأربع الأكثر أهمية من العددين مع بعضها، وعند وصل المقارنين مع بعضهما توصل مخارج المقارن الأول مع مداخل التوسيع في المقارن الثاني أما مداخل التوسيع للمقارن الأول (اليساري) فتوصل عادةً كما يلي:

($I_A < B$) Low ; ($I_A = B$) high ; ($I_A > B$) Low

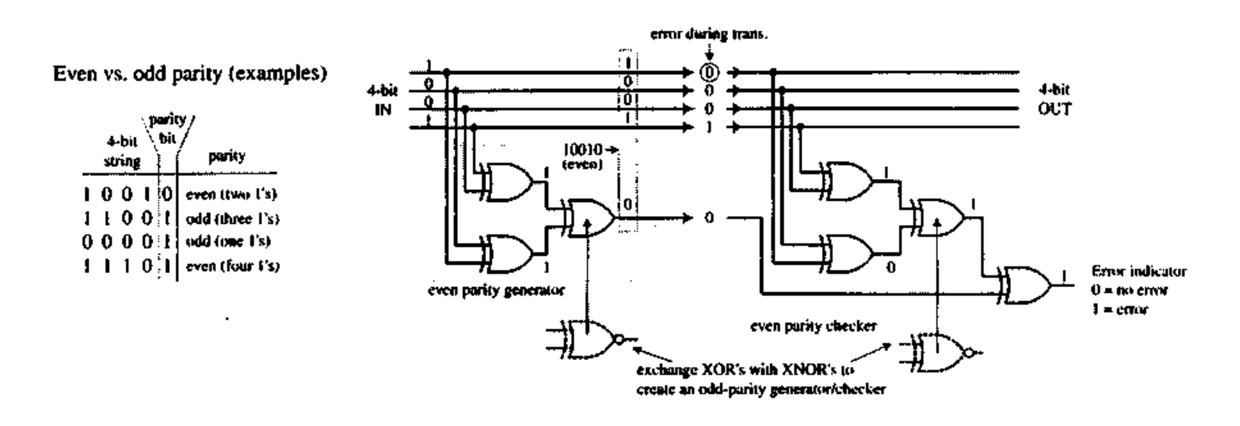


الشكل (50.12): مقارن قيمة 4-bit ومقارن قيمة 8-bit.

8.3.12 مختبر/مولد التكافؤ

يؤثر الضجيج الخارجي (external noise) على المعلومات الرقميَّة عند انتقالها على خط النقل من جهاز إلى آخر ويمكن أن يؤدي إلى تغيُّر إحدى خانات الرقم من حالة إلى أخرى، فمثلاً في النظام 4-bit المبيَّن في الشكل (51.12) تلتقط إرسالية BCD التالية (0100) ضجيجاً وتصبح (0101) أي 5 بدلاً من 4 قبل أن تصل إلى الجهاز الذي أُرسلت إليه.

يؤدي هذا النوع من الخطأ ـــ وحسب التطبيق ـــ إلى مشاكل خطيرة. ولتجنب هذا الخطأ يمكن استخدام مولد/أو كاشف تكافؤ كما في الشكل (51.12) والفكرة الأساسية في هذا المولد هي إضافة خانة إضافية (extra bit) تسمى خانة التكافؤ (parity bit) إلى المعلومات الرقمية المرسلة فإذا كانت خانة التكافؤ تجعل مجموع كل الخانات المرسلة (بما فيها خانة التكافؤ) فردياً، فإن تكافؤ المعلومات المرسلة يكون فردياً، أما إذا كانت خانة التكافؤ تجعل مجموع المعلومات المرسلة زوجياً فإن تكافؤ المعلومات يكون زوجياً. يقوم مولد التكافؤ بتوليد خانة التكافؤ، أما فاحص التكافؤ (parity checker) في طرف الاستقبال فإنه يحدِّد صحة تكافؤ المعلومات المرسلة. يتم الاتفاق مسبقاً على نوع التكافؤ (فردي أو زوجي) ولذلك فإن فاحص التكافؤ يعرف ما الذي يبحث عنه. يمكن وضع خانة التكافؤ على يسار الخانة MSB أو على يمين الخانة LSB وذلك بفرض أن الجهاز في طرف الاستقبال يعرف موقع خانة التكافؤ وخانات المعطيات. الدارة المبينة في الشكل (51.12) مصممة في نظام كشف خطأ بتكافؤ زوجي.

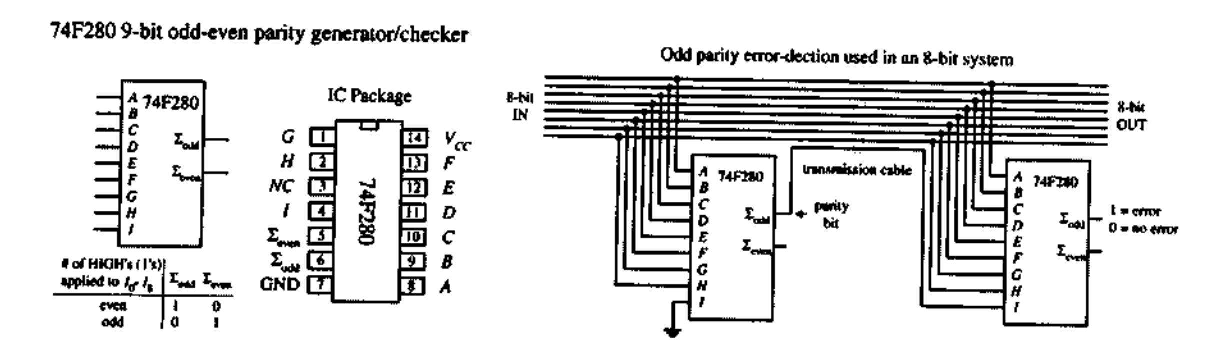


الشكل (51.12): نظام كشف خطأ 4-bit بتكافؤ زوجي.

إذا كنت غير راغب في تجميع دارة فاحص تكافؤ ومولد تكافؤ باستخدام بوابات، يمكنك استخدام الدارة المتكاملة 74F280 وهي عبارة عن فاحص/مولد تكافؤ 9-bit بتكافؤ فردي ـــ زوجي والدارة مبينة في الشكل (52.12).

تستخدم دارتان متكاملتان 74F280 لتكوين نظام كشف خطأ كامل، تعمل إحدى الدارتين كمولد تكافؤ وتعمل الدارة الثانية كفاحص تكافؤ. توصل مداخل المولد A حتى H إلى خطوط المعطيات الثمانية للطرف المرسل من الدارة، أما المدخل التاسع (I) فإنه يوصل مع الأرض عند استخدام الدارة كمولد (generator). إذا أردت إنشاء مولد تكافؤ فردي عليك وصل الخرج (Σ_{odd})، أما إذا أردت مولد تكافؤ زوجي فعليك وصل (Σ_{even}).

توصل المداخل الرئيسيَّة لفاحص التكافؤ 74F280 (من A حتى H) مع الخطوط الرئيسيَّة ويستقبل خط خانة التكافؤ على المدخل (I). يبيِّن الشكل (52.12) نظام كشف خط بتكافؤ فردي يمكن استخدامه في نظام نقل معطيات بـــ 8 خانات. إذا حصل خطأ يظهر (1) على الخرج Σ_{odd}.



الشكل (52.12): مولد/كاشف تكافؤ، نظام كشف خطأ.

9.3.12 ملاحظة عن التوجه إلى المتحكمات الصغرية والدارات المتكاملة غير المستخدمة

لقد غطينا أغلب الدارات التركيبيَّة التي تُناقش في المراجع الخاصة بالدارات الرقمية والتي تجدها أيضاً في الكتالوكات الإلكترونية. العديد من هذه الدارات ما تزال مستخدمة حتى هذه الأيام، أما بعضها الآخر كدارات الجمع الثنائي ومبدلات الشيفرات فقد توقف استعمالها.

يميل التوجه هذه الأيام إلى استخدام العناصر المتحكم بها بواسطة البرمجيات (software-controlled devices) كالمعالجات الصغرية (Microprocessors) والمتحكمات الصغرية (Microcontrollers) لإنجاز العمليات الحسابيَّة وعمليات التشفير (الترميز ــ تحويل الشيفرات)، وقبل أن تحاول تصميم أية دارة منطقية نقترح عليك الانتقال إلى الفقرة (12.12) وندعوك في تلك الفقرة إلى الانتباه إلى المتحكم الصغري (Microcontroller)، فالمتحكمات الصغرية مدهشة تماماً وهي بالأساس معالجات صغريّة ولكن برمجتها أسهل ووصلها مع التجهيزات الأخرى أيضاً أسهل من المعالجات الصغريّة.

تستطيع المتحكمات الصغريّة تجميع المعطيات، تخزين المعطيات، وإنجاز عمليات منطقية باستخدام معطيات الدخل. وكذلك تستطيع المتحكمات الصغرية توليد إشارات خرج يمكن استخدامها لقيادة الإظهار (display) والأجهزة الصوتية ومحركات الخطوة والسيرفو (Servos) وغيرها. تعتمد الوظائف الأساسية التي ينجزها المتحكم الصغري على البرنامج المخزَّن في ذاكرة داخلية نوع ROM. تتطلب برمجة المتحكم الصغري وحدة برمجة (programming unit) تقدمها الشركات الصانعة.

تتكون المبرمجة من جهاز يوصل مع الحاسوب عبر المنفذ التسلسلي أو التفرعي، وفي الحاسوب يوجد برنامج خاص للتعامل مع المبرمجة. يكتب برنامج التحكم الخاص بالمتحكم الصغري بواسطة الحاسوب بلغة عالية المستوى، كاللغة C مثلاً، أو ببعض اللغات الخاصة المصممة لبعض أنواع المتحكمات الصغريّة، وبعد الانتهاء من كتابة البرنامج وبضغطة زر واحدة يُحوَّل البرنامج إلى لغة الآلة (واحدات وأصفار) ويُحمَّل إلى ذاكرة المتحكم الصغري.

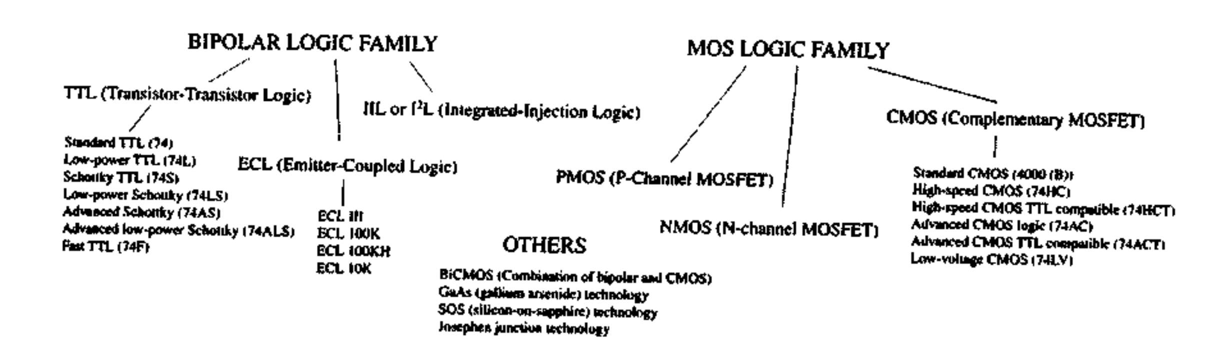
يمكن أن يغني متحكم صغري واحد، في الكثير من التطبيقات عن عدد كبير من الدارات المتكاملة المنفصلة (discrete components) لذلك من المغري فعلاً أن تترك الجزء المتبقى من هذا الفصل وتنتقل مباشرة إلى فقرة المتحكمات الصغرية (Microcontrollers)، ولكن هذا الانتقال سترافقه بعض المشاكل الأساسية. إذا كنت من المبتدئين فإنك حتماً تفتقد العديد من المبادئ الهامة للتحكم الرقمي والتي يمكن فهمها بسهولة من خلال فهم آلية عمل العناصر المنفصلة. ومن ناحية ثانية فإن العديد من الدارات الرقمية التي يمكنك تكوينها بسهولة لا تحتاج إلى القدر في التعقيد الذي يتطلبه المتحكم الصغري، وأخيراً ربما تشعر بالتخوف عند التعامل مع الكتالوكات الإلكترونية والتي تجد فيها كافة العناصر المتوفرة وتتساءل هل هذا العنصر قديم ولم يعد مستخدماً أم أنه متوفر. إن معرفة ما لم يعد مستخدماً من العناصر والدارات المتكاملة ومعرفة ما يجب تجنبه هو جانب هام من العملية التعليميَّة.

4.12 العوائل المنطقيّة

قبل الانتقال إلى المنطق التتابعي (sequential logic) سنتعرض لبعض الأمور العملية التي تخص العوائل المنطقية المتوفرة والمواصفات التشغيلية لهذه العوائل. سوف تتعرف في هذه الفقرة على بوابات فريدة تسمى بوابات المجمع المفتوح وبوابات قادح شميت. إنَّ المكون الأساسي لدارة متكاملة سواء كانت بوابة أو موزعاً أو متحكم صغري هو الترانزستور. يحدِّد نوع الترانزستور المستخدم في تكوين الدارة التكامليّة نوع العائلة المنطقية التي تنتمي إليها الدارة المتكاملة. الترانزستورات الأكثر استخداماً في تكوين الدارات التكاملية هي الترانزستورات ثنائية القطبيّة (bipolar transistors) وترانزستورات الـــ MOSFET، وبشكلٍ عام فإن الدارات المتكاملة ICs المصنوعة من ترانزستورات MOSFET تكون أقل حجماً، بسبب صغر حجم ترانزستور الـــ MOSFET، كما أنها ذات ممانعة عالية جداً للضجيج وتستهلك طاقة أقل مقارنة مع الدارات المتكاملة المصنوعة من ترانزستورات ثنائية القطبيَّة. إن ممانعة الدخل العالية وسعة دخل ترانزستورات الـــ MOSFET (بسبب البوابة المعزولة) تؤدي إلى ارتفاع الثوابت الزمنيَّة لعملية انتقال الترانزستور بين القطع والإشباع أو بين حالة (on) و(off)، وبالتالي تكون سرعة الفتح والإغلاق أقل من الترانزستورات ثنائية القطبيَّة، إلا أن التطور خلال السنوات الماضية قد قلَّص الفجوة بين تقنيات الترانزستورات الحقلية MOSFET وبالتالي داراتها المتكاملة والترانزستورات ثنائية القطبيَّة.

تُصنف العوائل المنطقيَّة MOSFET وثنائية القطبيَّة إلى أصناف فرعية.

تتضمن العوائل الأساسية ثنائية القطبيَّة كلاً من عائلة TTL، (Transistor-Transistor-Logic)، عائلة ECL (emitter-coupled logic)، عائلة (IIL) (Integrated Injection Logic)-I²L، أما الأصناف الفرعية الأساسيّة من عوائل الـــ MOSFET فهي الـــ PMOS والـــ NMOS والـــ CMOS.



الشكل (53.12): العوائل المنطقية.

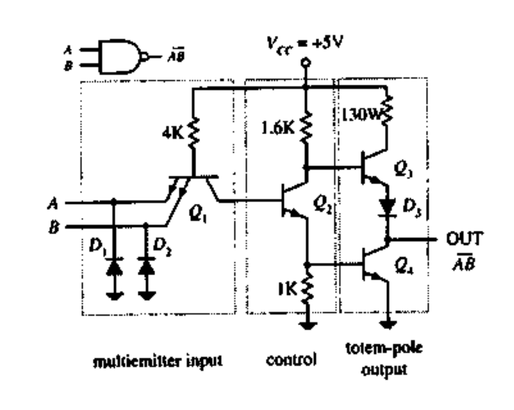
تستخدم عائلة الـــ CMOS تكنولوجيا NMOS وPMOS (أي أنها تستخدم ترانزستورات قنال N وترانزستورات قنال P). العوائل الأكثر انتشاراً هي عوائل TTL وCMOS أما العوائل الأخرى فتستخدم عادة في الدارات التكاملية ذات درجة التكامل العالية كالمعالجات الصغرية والذواكر وتظهر دوماً تكنولوجيا جديدة تساهم في إنتاج دارات متكاملة أسرع وأكثر كفاءة، ومن هذه التقنيات BICMOS، Ga AS، SOS وغيرها. تُصنف الدارات المتكاملة من عوائل TTL وCMOS إلى أصناف وظيفيَّة كسلاسل 7400 و[74F، 74LS، 74HC من CMOS ....] أو سلسلة 4000 CMOS (أو سلسلة 4000B المحسَّنة وهناك سلسلة أخرى هي سلسلة 5400 وهذه السلسلة مثل سلسلة 7400 (نفس وظائف الأرجل، نفس الوظائف المنطقيَّة)، ولكنها أغلى من سلسلة 7400 لأنها مصممة للتطبيقات العسكريَّة والتي تتطلب تسامحات أكبر في قيم جهود التغذية وتعمل في مجالات واسعة لدرجات الحرارة، فمثلاً تحتاج الدارة المتكاملة 7400 لجهد تغذية يتراوح بين (4.75 V) و(5.25 V) ومجال درجات حرارة من (0 °C) إلى 70 °C، أما الدارة 5400 فتعمل بجهود تتراوح بين (4.5 V) و(5.5 V) ومجال درجات حرارة من (-55 °C) إلى (125 °C).

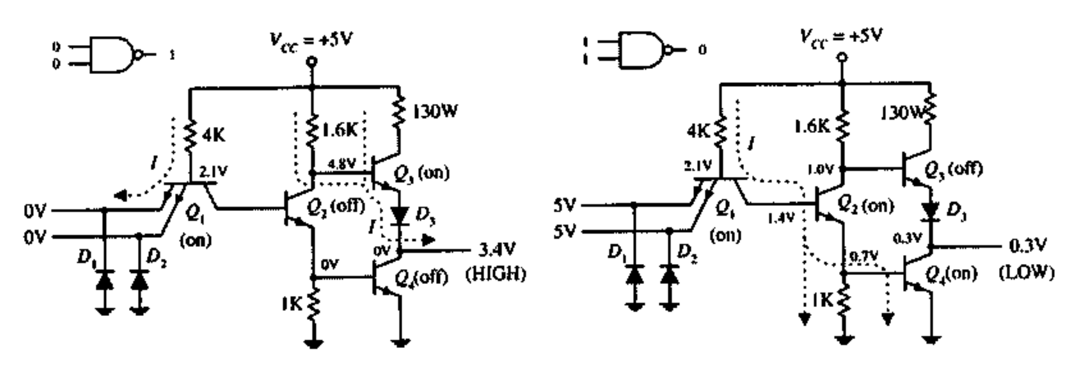
1.4.12 عائلة TTL للدارات المتكاملة

تسمى سلسلة TTL الأصلية باسم سلسلة TTL المعيارية (Standard TTL) 74xx، وقد طورت هذه السلسلة في الستينات (1960s) وهذه السلسلة ما تزال مستخدمة حتى الآن على الرغم من أن أداءها أقل من أداء العوائل الفرعية الجديدة مثل 74LSxx و74ALSxx و74Fxx، وسنتعرف الآن على الدارة الأساسية لبوابة NAND في عائلة TTL المعيارية ورقم الدارة التكاملية التي تحوي هذه البوابة (7400) كما سنتعرف على مبدأ عمل هذه البوابة. تتكون بوابة NAND الأساسية في عائلة TTL المعياريّة من ثلاثة أجزاء رئيسيَّة هي قسم دخل وهو عبارة عن ترانزستور متعدد البواعث وقسم تحكم (control section)، ومرحلة خرج تسمى مرحلة خرج طوطمي (totem pole output). يعمل الترانزستور Q_1 متعدد البواعث (باعثين في الشكل) كدخلين لبوابة AND، أما الديودات D_1 وD_2 فتعمل كديودات قص سالب لحماية المداخل من أية جهود دخل سالبة يمكن أن تخرِّب الترانزستور. يؤمن الترانزستور Q_2 تكبيراً للتيار وتضخيماً لمرحلة الخرج. عندما يكون الخرج high (1) يكون Q_4 في حالة (off) وQ_3 في حالة (on)، أما عندما يكون الخرج Low فإن Q_3 يكون في حالة قطع (off) وQ_4 في حالة إشباع (on)، وبما أن أحد ترانزستورات الخرج يكون في حالة (off) فإن التيار الذي يمر من Vcc إلى الأرض يكون أصغرياً.

يبيِّن الشكل السفلي بوابة NAND لخرج في حالة High ودارة أخرى لخرج في حالة Low مع القيم التقريبيّة للجهود في عقد مختلفة من الدارات.

لاحظ أن القيم الدقيقة لجهد الخرج ليست (0 V) عندما يكون الخرج (Low) وكذلك ليست (+5 V) عندما يكون الخرج high وذلك نتيجة لانخفاض الجهد على المقاومات والديودات والترانزستورات. والقيمة الفعلية للجهد في الخرج عندما يكون الخرج high هي تقريباً (3.4 V) وعندما يكون الخرج Low فإن جهد الخرج يساوي تقريباً (0.3 V). لتكوين بوابة NAND بثمانية مداخل يجب أن يكون لترانزستور الدخل ثمانية بواعث.



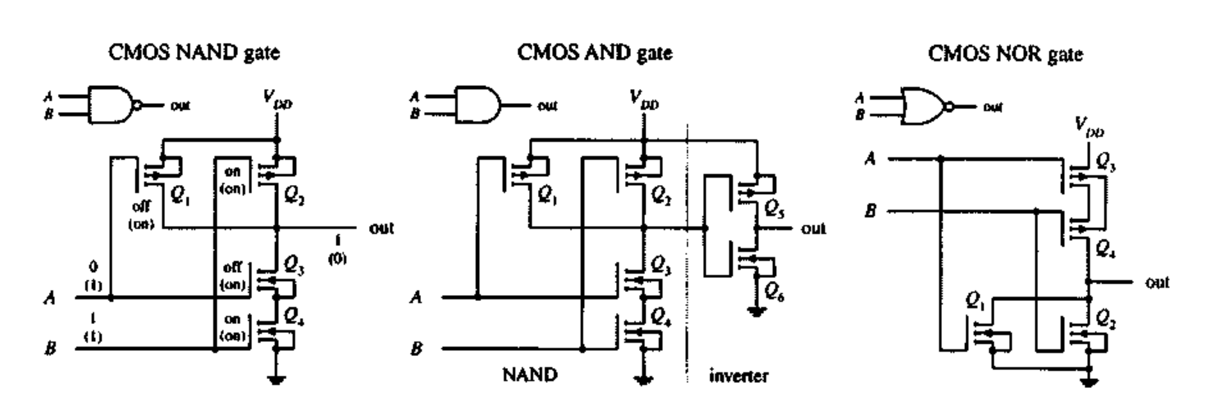


الشكل (54.12): دارة بوابة NAND الأساسية، دارات بوابات NAND في حالات خرج high وخرج Low.

أجري أول تعديل على سلسلة TTL المعيارية بتخفيض قيم المقاومات الداخلية للبوابات من أجل تخفيض الثابت الزمني RC وزيادة سرعة العمل (تخفيض تأخير الانتشار) وقد قاد هذا التعديل إلى سلاسل 74Hxx. ومع أن سلسلة 74Hxx قد حسّنت السرعة (تقريباً ضاعفت السرعة بالمقارنة مع TTL المعياريّة) إلا أن استهلاك الاستطاعة فيها قد زاد أكثر من الضعف. وظهرت بعد ذلك سلاسل 74Lxx وقد تم في هذه السلسلة زيادة قيم كافة المقاومات مقارنة مع TTL المعيارية فانخفض استهلاك الطاقة ولكن تأخير الانتشار ازاد أيضاً (انخفضت سرعة الأداء). حدث تطور ملحوظ في السرعة مع تطور سلاسل 74Sxx (سلسلة شوتكي Schottky TTL) وقد تم في هذه السلسلة وضع ديود شوتكي بين قاعدة ومجمع كل ترانزستور وتساهم هذه الديودات في إلغاء الآثار السعوية الناتجة عن تخزين الشحنات في قواعد الترانزستورات عن طريق تمرير الشحنة إلى منطقة المجمع، وتعتبر ديودات شوتكي الخيار الأمثل لهذه الغاية بسبب ميزاتها في تجميع عدد قليل جداً من الشحنات، وقد أدى هذا التعديل إلى زيادة السرعة بمقدار (5) مرات وتضاعف استهلاك الاستطاعة. ظهرت مع مرور الزمن واستخدام تقنيات تكامل مختلفة، وزيادة قيم المقاومات الداخلية سلاسل جديدة مثل سلسلة 74LS التي تتميز باستهلاك استطاعة يساوي ثلث استهلاك الاستطاعة لسلسلة 74S. وبعد سلسلة 74LS ظهرت سلسلة 74ALS (advanced low power schottkey) والتي تمتاز بأداء أفضل. أخيراً ظهرت سلسلة 74F والتي استخدم في تكوينها معالجة جديدة وهي العزل بالأكسدة (oxide isolation) وقد أدت هذه المعالجة إلى تخفيض تأخير الانتشار وخفضت الحجم الكلي. توجد العديد من السلاسل القديمة في الكتالوكات الإلكترونية، وتستخدم هذه السلاسل حسب نوع الأداء المطلوب.

2.4.12 عائلة CMOS للدارات التكاملية

ظهرت عائلة CMOS في فترة تطور سلاسل جديدة من عائلة TTL، وقد طوِّرت سلسلة CMOS 4000 الأصلية (أو سلسلة 4000B المحسنة) لتكون أقل استهلاكاً للطاقة من عائلة TTL وقد تم تحقيق هذه الميزة بسبب مقاومة الدخل العالية لترانزستورات MOSFET. يتراوح مجال جهد التغذية لسلسلة 4000B بين (V 3+) و(V 18+) والقيمة الدنيا للجهد المنطقي high تساوي $\left(\frac{2}{3}V_{DD}\right)$ أما القيمة العظمى لجهد الخرج Low فتساوي $\left(\frac{1}{3}V_{DD}\right)$. تعتبر سلسلة 4000B أقل استهلاكاً للطاقة من عائلة TTL ولكنها أقل سرعة وأكثر عرضة للضرر بسبب الشحنات الكهربائية الساكنة. يبيِّن الشكل (55.12) الدارات الداخلية لبوابات NOR، AND، NAND في عائلة CMOS ولتوضيح آلية عمل هذه الدارات طبق مستوى منطقي high (1 منطق) أو مستوى منطقي Low (0 منطق) على المداخل وناقش أياً من الترانزستورات ينتقل إلى حالة (on) وأيها ينتقل إلى حالة (off).



الشكل (55.12): بوابات NAND، AND وNOR من عائلة CMOS.

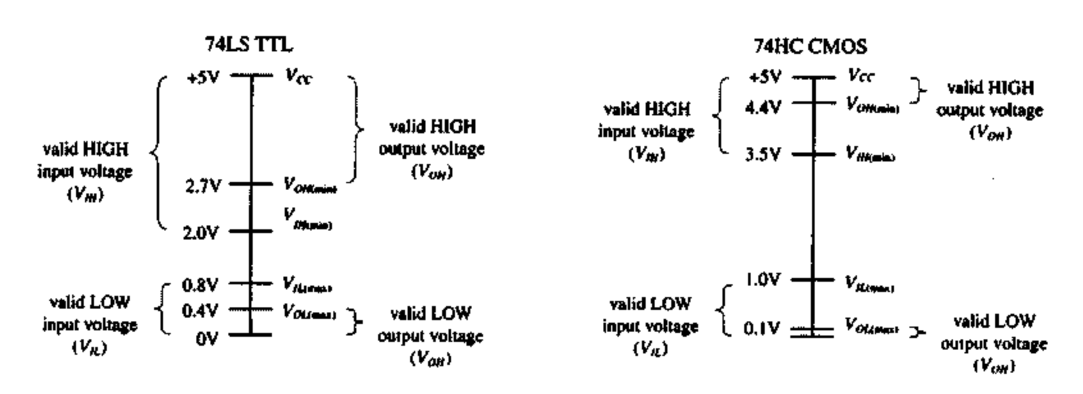
حصل تطور في سرعة الأداء بالمقارنة مع سلسلة 4000B وذلك مع ظهور سلسلة 40H00، ومع أن هذه السلسلة أسرع من سلسلة 4000B إلا أنها أقل سرعة من 74LSTTL. أنتجت سلسلة 74C من عائلة CMOS كي تكون متآلفة بوظائف الأرجل مع عائلة TTL، وظهرت تطورات جديدة في عائلة CMOS مع ظهور سلاسل 74HC و74HCT، وهذه السلاسل متآلفة بوظائف الأرجل مع عائلة TTL.

السلسلة 74HC (high-speed CMOS) لها نفس سرعة سلسلة 74LS ولها نفس استهلاك الطاقة لسلسلة CMOS التقليديَّة. تم تطوير سلسلة 74HC (سلسلة CMOS عالية السرعة المتآلفة مع TTL (high speed CMOS TTL Compatible) بحيث تكون داراتها المتكاملة قابلة للتبديل مع الدارات المناظرة من عائلة TTL (نفس المداخل ــ والمخارج والمستويات المنطقيَّة). تعتبر سلسلة 74HC شائعة الاستخدام كثيراً هذه الأيام. لقد قاد التطور الدائم في تكنولوجيا التصنيع إلى ظهور سلاسل CMOS المتطورة (advanced CMOS Logic) التالية 74AC و74ACT.

وصلت سرعة العمل في سلسلة 74AC إلى قيم مقاربة لسلاسل 74F TTL، وكذلك صممت سلسلة 74ACT لتكون متآلفة مع عائلة TTL.

3.4.12 جهود الدخل/الخرج وهوامش الضجيج

تختلف مستويات الجهود المنطقية التي تعتبر (high) والتي تعتبر (Low) في الدخل من عائلة إلى أُخرى، وكذلك الأمر بالنسبة للمستويات المنطقية في الخرج. يبيِّن الشكل (56.12) المستويات الصحيحة لجهود الدخل والخرج لسلاسل 74LS من عائلة TTL و74HC من CMOS.



الشكل (56.12): مستويات (Low) و(High) لسلاسل 74LS و74HC.

وفي الشكل نجد الرموز التالية:

V_{IH}: مجال الجهد المسموح لحالة High في الدخل.

V_{IL}: مجال الجهد المسموح لحالة Low في الدخل.

V_{OL}: مجال الجهد المسموح في الخرج لحالة Low.

V_{OH}: مجال الجهد المسموح في الخرج لحالة High.

وتلاحظ من الشكل (56.12) أنه يمكن وصل مخارج بوابات 74HC مع مداخل 74LS دون مشاكل، لأن مستويات جهد الخرج لسلسلة 74HC تقع ضمن مجال جهود الدخل لسلسلة 74LS، ولكن العكس غير صحيح أي لا يمكن قيادة مداخل 74HC من مخارج 74LS لأن مستوى الخرج العالي لـــ 74LS صغير جداً بالنسبة لمستوى الجهد High في 74HC، وسندرس لاحقاً دارات الربط (Interfaces) بين العوائل المختلفة.

4.4.12 معدلات التيار، الخرج المروحي وتأخير الانتشار

تستطيع مداخل ومخارج الدارات المتكاملة امتصاص أو إصدار كمية محدّدة من التيار. يُعرَّف I_{IL} بأنه تيار الدخل الأعظمي عندما يكون الدخل Low، أما I_{IH} فهو تيار الدخل الأعظمي عندما يكون الدخل High، وبنفس الطريقة تعرَّف I_{OH} وI_{OL} كما يلي:

I_{OH}: تيار الخرج الأعظمي عندما يكون الخرج High.

I_{OL}: تيار الخرج عندما يكون الخرج Low.

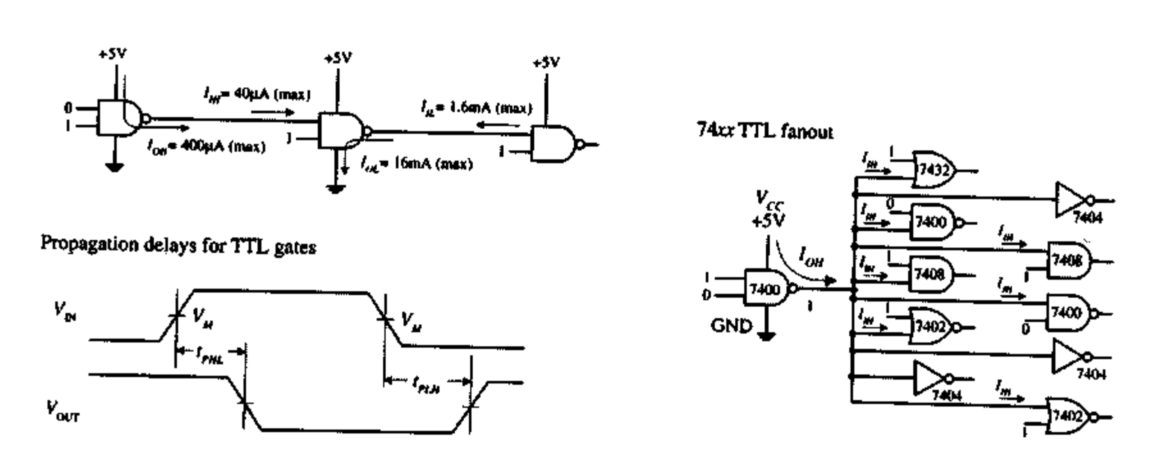
وكمثال فإن قيم تيارات بوابة من سلسلة TTL المعيارية 74xx هي:

I_{IL} = -1.6 mA; I_{IH} = 40 µA; I_{OL} = 16 mA; I_{OH} = -400 µA

إشارة الناقص تدل على أن التيار يصدر من البوابة (يخرج منها) وتعمل البوابة كمصدر (source)، أما التيار الموجب فهو تيار يدخل البوابة وتمتص الدارة هذا التيار. إن مقدار التيار الذي تستطيع البوابة إصداره أو امتصاصه يحدد الحمل الذي يمكن وصله مع البوابة. يُعرَّف الخرج المروحي (Fan out) بأنه العدد الكلي للمداخل التي يمكن قيادتها من خرج بوابة واحدة من نفس العائلة دون تجاوز معدلات التيار للبوابة. وعند حساب الخرج المروحي نوجد (I_{OL}/I_{IL}) و(I_{OH}/I_{IH}) ونعتبر النتيجة الأصغر هي الخرج المروحي وكمثال على ذلك نجد أن الخرج المروحي لسلسلة 74xx المعيارية يساوي (10) - (16 mA/1.6 mA).

أما في سلسلة 74LS فإن الخرج المروحي يساوي 20. في سلسلة 74HC إذا طبقت نبضة مربعة على دخل بوابة منطقية فإن نبضة الخرج سيكون لها زمن صعود وزمن هبوط (rise time) و(fall time) كما في الشكل (57.12) ويُعرَّف زمن الصعود (t_r) بأنه الزمن الذي يستغرقه الجهد للارتفاع من نسبة 10 % إلى 90 % من القيمة العظمى للجهد (إذا كان الجهد الأعظمي 5 V فإن 10 % منها تساوي (0.5 V) و90 % منها تساوي (4.5 V). أما زمن الانخفاض فهو الزمن الذي يحتاجه الجهد للانخفاض من مستوى 90 % إلى مستوى 10 % من القيمة العظمى، وأزمنة الصعود والهبوط هذه صغيرة عند مقارنتها بتأخير الانتشار بين لحظة تطبيق التغيُّر على الدخل ولحظة الاستجابة في الخرج.

ينتج تأخير الانتقال عن محدودية سرعات الفتح والإغلاق للترانزستورات الداخلية ضمن البوابة المنطقيَّة. يُعرَّف زمن تأخير الانتشار T_{PHL} بأن الزمن الذي يستغرقه الخرج للانتقال من High إلى Low وذلك اعتباراً من لحظة التغيُّر transition (أو العبور) في الدخل. يجب أخذ تأخير الانتشار بالاعتبار عند تصميم الدارات وخصوصاً عند التعامل مع المنطق التتابعي حيث يلعب التوقيت (timing) دوراً حاسماً. تُعطى في الأشكال (58.12) و(59.12) أزمنة التأخير النموذجية لدارات متكاملة مختلفة من عوائل TTL وCMOS، وتُعطى معلومات أكثر دقة في نشرات المعطيات التي تقدمها الجهات الصانعة.



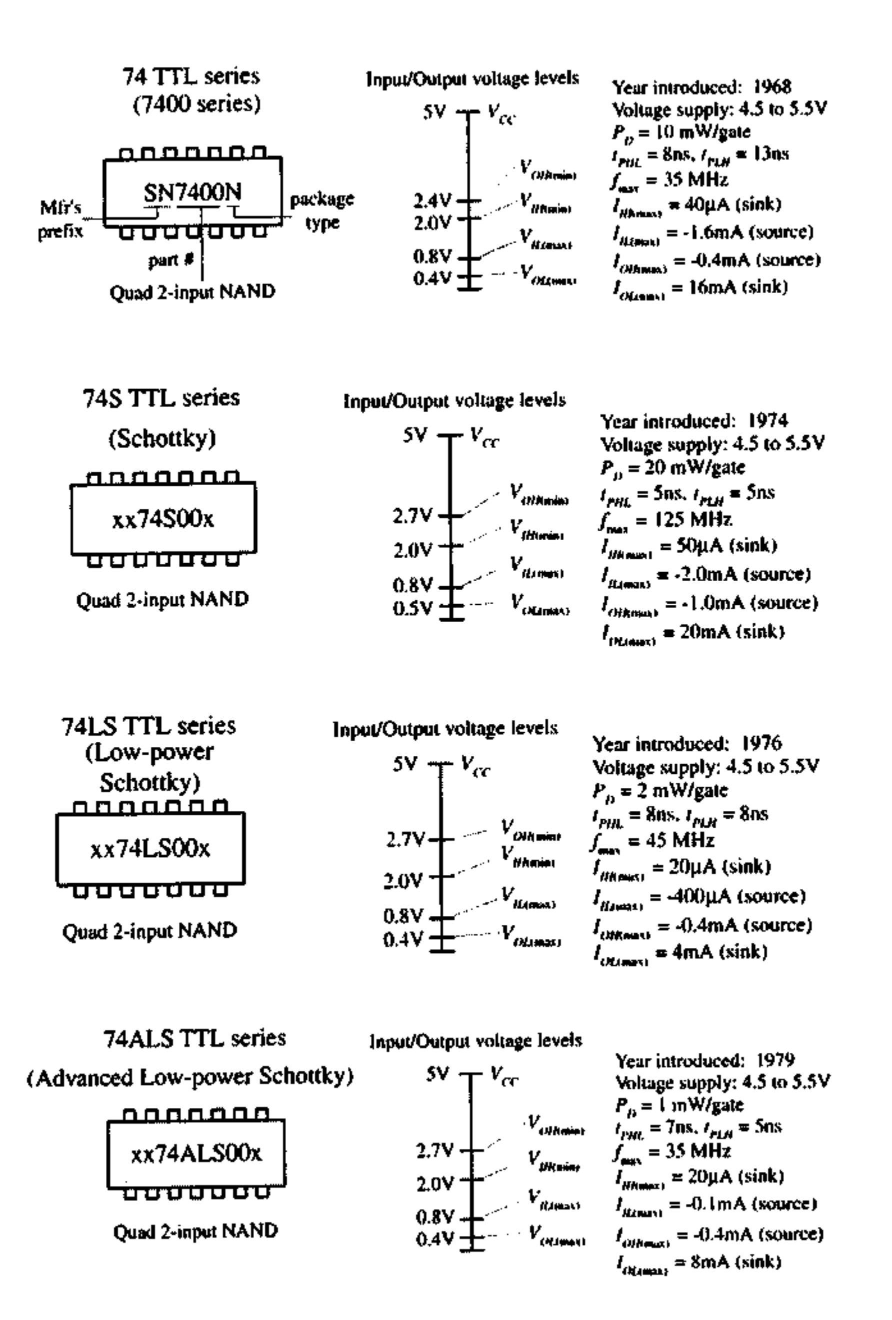
الشكل (57.12): أزمنة التأخير وتيارات الدخل والخرج - والخرج المروحي.

5.4.12 نظرة تفصيلية لعوائل مختلفة من TTL وCMOS

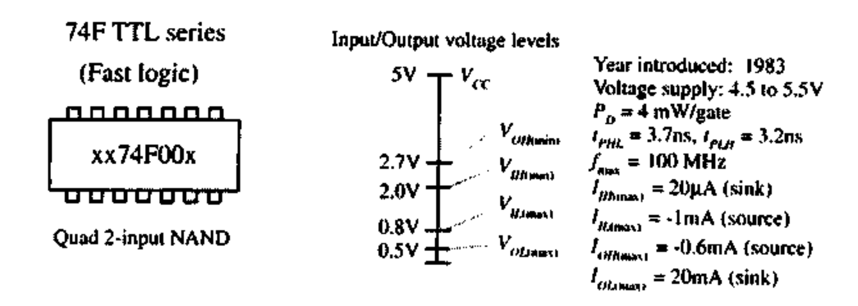
إنّ المعلومات التالية، المعطاة في الأشكال (58.12) و(59.12)، وخصوصاً المعطيات التي تخص تأخيرات الانتشار ومعدلات التيار، تمثل قيماً نموذجية (typical values) لسلسلة منطقية معطاة.

ومن أجل الحصول على معلومات أكثر دقة عن دارة تكاملية محدَّدة عليك العودة إلى المراجع التي تقدمها الجهات الصانعة، ولذلك فإن المعلومات الموجدة في الأشكال هي فقط لتكوين فكرة لديك عن أداء سلسلة منطقية معطاة.

سلاسل TTL

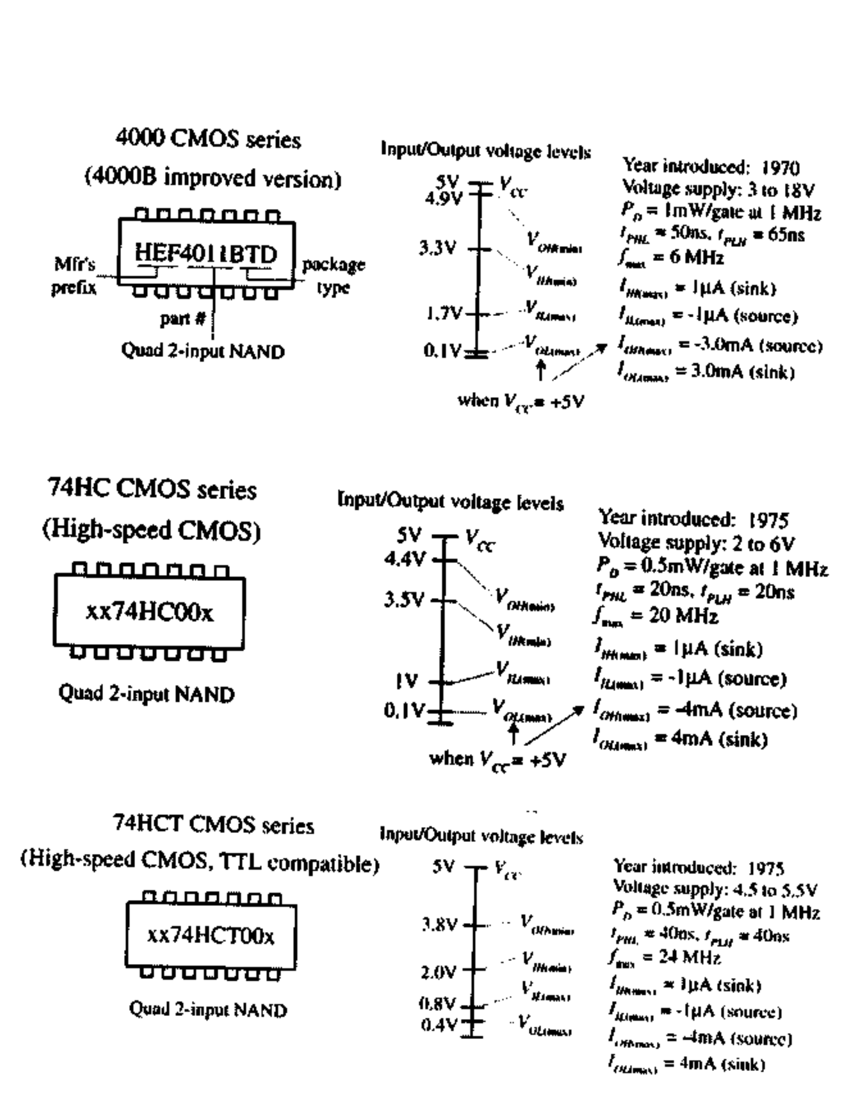


الشكل (58.12): معلومات ومعطيات لدارات تكاملية من سلاسل TTL.

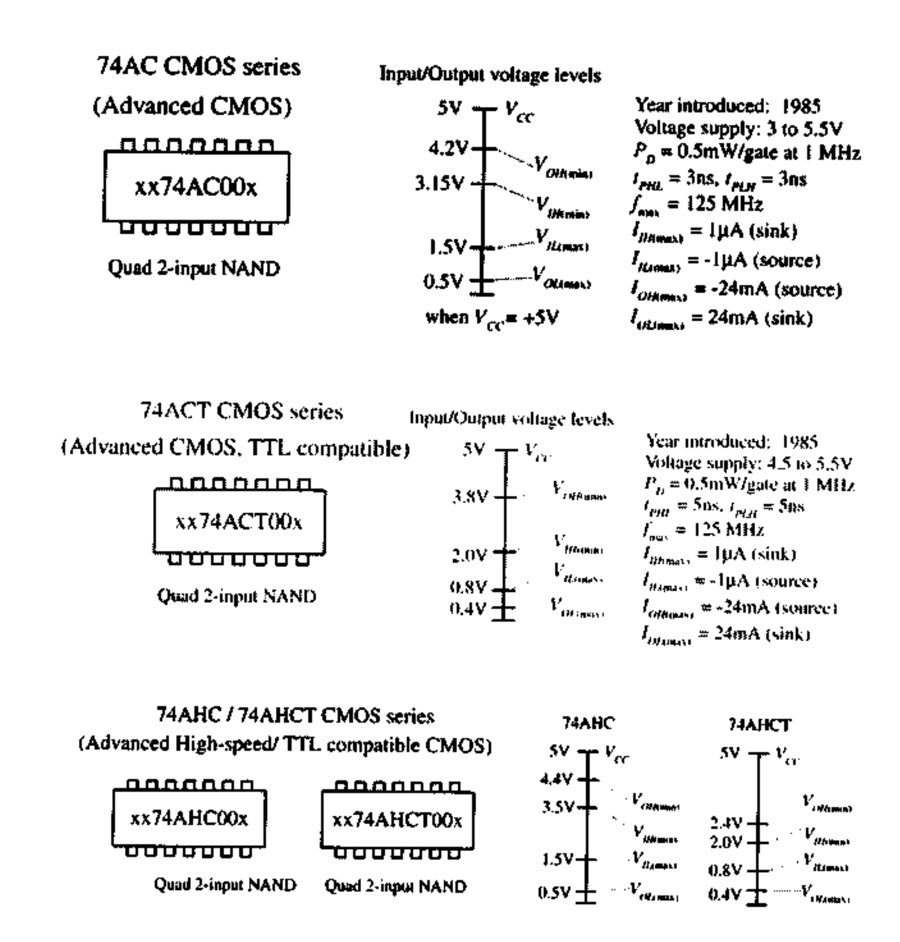


تابع الشكل (58.12): معلومات ومعطيات لدارات تكاملية من سلاسل TTL.

سلاسل CMOS



الشكل (59.12): معلومات ومعطيات لدارات تكاملية من سلاسل CMOS.



تابع الشكل (59.12): معلومات ومعطيات لدارات تكاملية من سلاسل CMOS.

6.4.12 نظرة إلى عدد من السلاسل المنطقية الأخرى

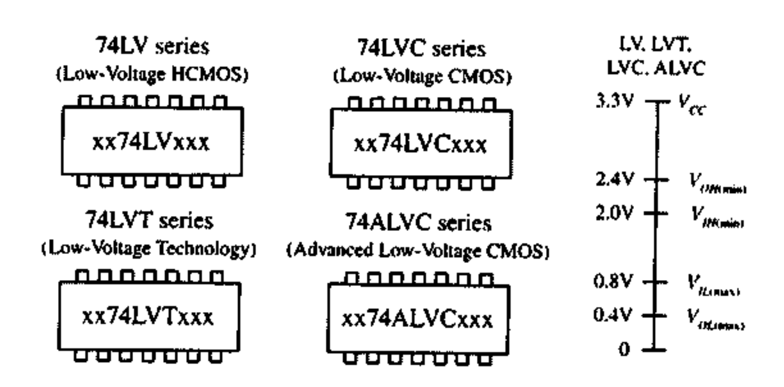
سلاسل 74BiCMOS

تجمع سلاسل 74BiCMOS أفضل خصائص تقنيات CMOS والتقنية ثنائية القطبيَّة في غلاف واحد، والتأثير الكلي لذلك هو أداء عالي السرعة ومنخفض استهلاك الاستطاعة، وهذا النوع من العوائل المنطقية مناسب بشكلٍ خاص للاستخدام في الملاءَمة مع ممرات المعطيات للمعالجات الصغريَّة (Microprocessor bus interface) ويتحدد استخدامه تقريباً بهذه الوظائف. تستخدم كل جهة صانعة لاحقة suffix مختلفة لتمييز منتجاتها فمثلاً تستخدم شركة Texas Instruments الترميز 74BCTxx أما شركة Signetics (من Phillips) فتستخدم الترميز 74ABTxx.

سلاسل 74 منخفضة الجهد

إن سلاسل 74 منخفضة الجهد هي سلاسل حديثة نسبياً وتستخدم جهد تغذية اسمياً منخفضاً (3.3 V)، ومن أعضاء هذه السلسلة السلاسل الفرعية التالية:

74LV وهي سلسلة HCMOS منخفضة الجهد، والسلسلة 74LVC (سلسلة CMOS منخفضة الجهد)، والسلسلة 74LVT (سلسلة Low Voltage Technology)، وسلسلة 74ALVC (سلسلة جهد منخفض متطورة Advanced Low Voltage CMOS). انظر الشكل (60.12).

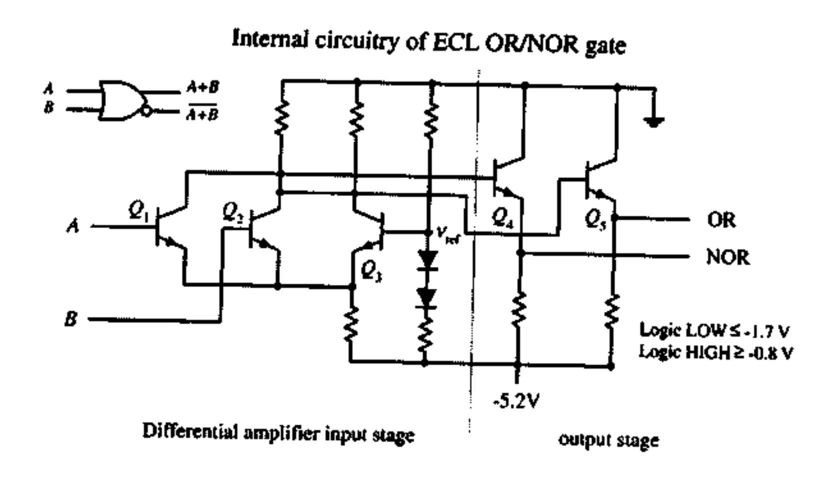


الشكل (60.12): بعض الدارات التكاملة من سلاسل 74 منخفضة الجهد.

صممت سلاسل 74 منخفضة الجهد كسلاسل منطقية جديدة تعمل من جهد منخفض (3.3 V) وتستخدم في التطبيقات منخفضة الجُهد (كالأجهزة التي تغذى من بطاريات). تمتاز سلاسل 74 منخفضة الجهد بسرعة العمل وتتراوح سرعة الاستجابة من (9 ns) في سلاسل LB حتى (12 ns) في سلاسل ALVC. توجد ميزة أُخرى جيدة لسلاسل 74-Low Voltage وهي قدرة القيادة الكبيرة لمخارج بواباتها، فمثلاً تستطيع مخارج بوابات LVT امتصاص حتى 74 mA وتعطي تياراً حتى 32 mA.

منطق الربط الباعثي

ينتمي منطق الربط الباعثي (ECL) إلى العائلة ثنائية القطبيّة، ويستخدم للتطبيقات ذات السرعات العالية جداً، وتصل سرعاتها إلى 500 MHz، وأزمنة تأخيرها أقل من 0.8 ns ولكن عائلة ECL تستهلك استطاعة كبيرة مقارنة مع عوائل TTL وCMOS وتعتبر عائلة ECL مناسبة جداً للاستخدام في الحواسيب حيث لا يعتبر استهلاك الاستطاعة مشكلة وبنفس الوقت يُطلب تحقيق سرعات عالية، وتفسير السرعة العالية في العمل في عائلة ECL هو أن ترانزستورات بوابات هذه العائلة لا تصل نهائياً إلى الإشباع (Saturation) أثناء العمل وتتحدَّد مستويات الجهود High وLow بالترانزستور الموجود في دارة المضخم التفاضلي والذي يكون في حالة تمرير (conducting). يبين الشكل (61.12) الدارة الداخلية لبوابة OR/NOR في عائلة ECL، ومستويات الجهود High وLow في هذه العائلة هي على التَرتيب (-0.8 V) و(-1.7 V)، أما جهد التغذية فيساوي (-5.2 V)، وجهد التغذية هذا غير اعتيادي ويسبب مشاكل عند ربط بوابات من عائلة ECL مع بوابات من عائلة CMOS.



الشكل (61.12): الدارة الداخلية لبوابة OR/NOR في عائلة ECL.

تتكون دارة بوابة OR/NOR من مرحلة دخل (مضخم تفاضلي) ومن مرحلة خرج. يُطبق جهد مرجعي على قاعدة الترانزستور Q_3 ويتم تأمين هذا الجهد المرجعي بواسطة مقسِّم جهد مكوَّن من مقاومات وديودات.

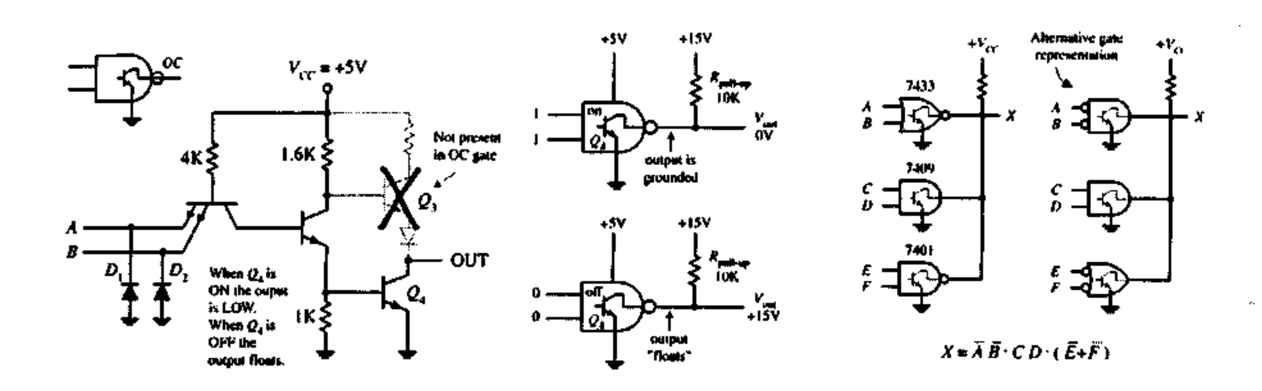
يُحدِّد هذا الجهد المرجعي العتبة (Threshold) بين المستويات المنطقيَّة (Low) و(High). عندما يكون جهد قاعدة Q_3 أكثر إيجابية من جهد بواعث Q_1 وQ_2، فإن Q_3 يمرر التيار، وعندما يمرر الترانزستور Q_5 تياراً فإن خرج OR ينتقل إلى حالة Low. إذا طبق جهد (-0.8 V) على أحد المداخل (A) أو (B)، فإن قاعدة Q_1 أو قاعدة Q_2 تكون أعلى جهداً من قاعدة Q_3 ويتوقف Q_3 عن التمرير وينتقل خرج OR إلى حالة (High). في عائلة ECL لا ينتقل أي من الترانزستورات إلى الإشباع أثناء العمل ولا تتجمع حوامل الشحنات في منطقة القاعدة للترانزستورات ولذلك تكون سرعة العمل كبيرة.

7.4.12 بوابات منطقيَّة بمخارج ذات مجمَّع مفتوح

توجد دارات متكاملة من عائلة TTL ذات خرج بمجمع مفتوح، وذلك بخلاف الخرج الطوطمي الذي تعرفت عليه سابقاً. (توجد في عائلة CMOS دارات مشابهة بخرج ذي مصرف مفتوح open drain). والدارات المتكاملة ذات المجمع المفتوح لا تتعارض مع البوابات المنطقية النموذجية التي دُرست سابقاً، ولكنها تتميَّز بمواصفات خرج مختلفة. يبيِّن الشكل (62.12) دارة بوابة NAND ذات خرج بمجمع مفتوح (OC).

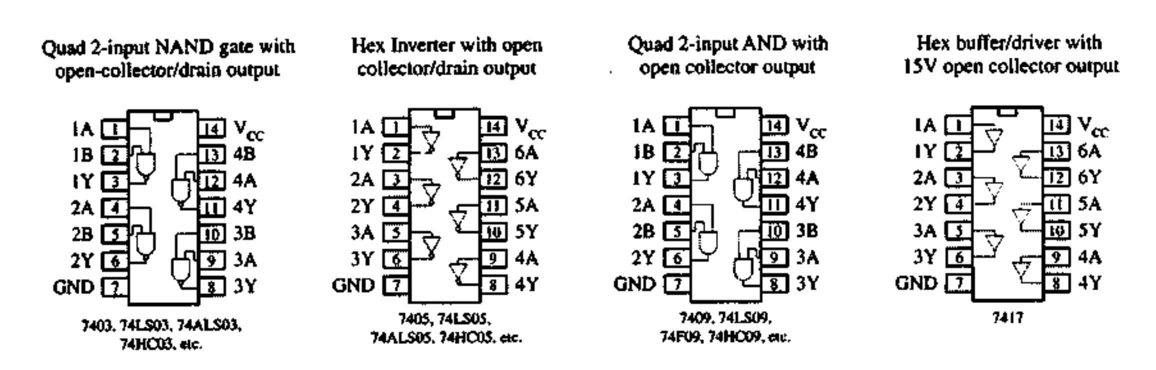
لاحظ أن الترانزستور Q_3 يُحذف من هذه الدارة، وبإزالة هذا الترانزستور لا ينتقل الخرج إلى حالة High عندما تكون المداخل A وB 00 أو 01 أو 10 وإنما يصبح عائماً، أما عندما تكون المداخل A وB في حالة (1) منطق فإن الخرج يكون مؤرضاً. هذا الوضع يعني أن البوابة ذات الخرج المفتوح المجمع تستطيع فقط امتصاص (Sink) التيار، وهي لا تستطيع أن تعطي أو تُصدر تياراً! إذن كيف نحصل من البوابة على خرج High؟ كي نحصل من البوابة على خرج High نستخدم مصدر تغذية مستمرة ومقاومة شد (pull-up resistor).

كما في البوابات الموجودة في وسط الشكل (62.12). عندما يكون الخرج عائماً ونوصله بمقاومة شد مع مصدر جهد مستمر فإن جهد الخرج يُصبح مساوياً لجهد المصدر المستمر الخارجي (أي 15 V + في الشكل). يمكنك أيضاً استخدام جهد التغذية 5 V + (الذي يُغذي البوابة) لوصل مقاومة الشد إليه ولكن ذلك غير إلزامي وتعتبر إمكانية وصل مقاومة شد خارجية مع مصدر جهد مغاير لجهد تغذية البوابة إحدى ميزات البوابات ذات المجمع المفتوح إذ أنها تصبح قادرة على قيادة بوابات تتطلب مستويات منطقية مخالفة للمستويات المستخدمة في الدارة المنطقيَّة.



الشكل (62.12): دارة بوابة NAND بمجمع مفتوح (لاحظ عدم وجود مرحلة الخرج الطوطمي)، استخدام مقاومات الشد مع بوابات المجمع المفتوح، توصيل مخارج بوابات NAND ذات مجمع مفتوح مع بعضها.

تمتاز البوابات ذات المجمع المفتوح بقدرتها على امتصاص تيارات أكبر من البوابات العاديّة، فمثلاً تستطيع بوابات خرج الدارة المتكاملة 7405 (عواكس/عوازل) امتصاص 40 mA، وهذا التيار أكبر بـــ (10) مرات من التيار الذي يمتصه خرج بوابات 7404. الدارة المتكاملة 7404 هي دارة عازل buffer ذات مجموع مفتوح وامتصاص التيارات في مخارج بوابات هذه الدارة المتكاملة يساوي قدرة امتصاص مخارج بوابات الدارة المتكاملة 7406 ذات المجمعات المفتوحة، إلا أن الدارة 7404 لا تحقق أي تابع منطقي وتستخدم كعازل (buffer). يستفاد من ميزة امتصاص التيار الكبير في بوابات المجمع المفتوح في قيادة الحواكم والمحركات وديودات الإظهار LEDs وأحمال أخرى عالية التيار. يبيِّن الشكل (63.12) عدداً من الدارات المتكاملة ذات المجمعات المفتوحة في الخرج.



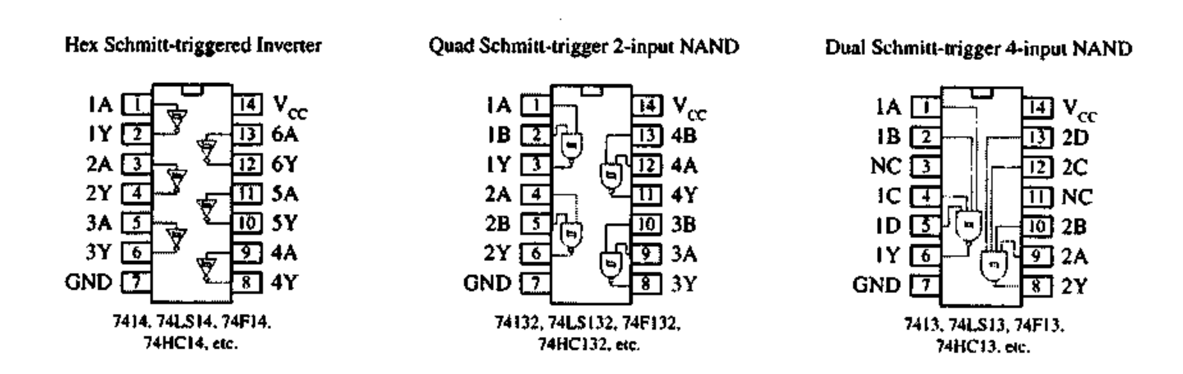
الشكل (63.12): دارات متكاملة لبوابات ذات مجمع مفتوح.

تعتبر بوابات المجمع المفتوح مفيدة في الحالات التي توصل فيها مخارج عدة بوابات مع بعضها. إذا كنت تستخدم بوابات معياريّة بمراحل خرج طوطمي، وإذا كان خرج إحدى البوابات high (+5 V) وكانت مخارج البوابات الأخرى Low (أصفار)، فإذا وصلت المخارج مع بعضها سوف يحدث قصر ويمكن أن يؤدي هذا القصر إلى تعطيل كافة البوابات. عند التعامل مع بوابات ذات خرج مفتوح لا يمكنك تطبيق قواعد جبر بول المستخدم سابقاً مع البوابات المعيارية ويستخدم بدلاً من ذلك منطق AND الموصول wired-AND Logic، والذي يسمح بوصل مخارج البوابات مع بعضها كما في الشكل (62.12) ولكي يكون الخرج (high) يجب أن تكون مخارج كافة البوابات (high).

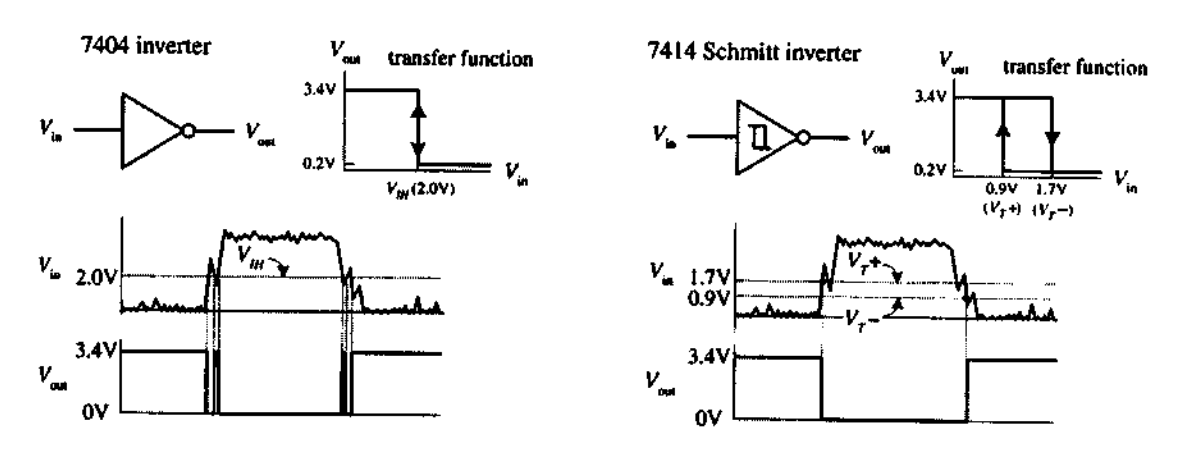
8.4.12 بوابات قادح شميت

تتوفر بوابات ذات مهام خاصة تسمى بوابات قادح شميت، ولبوابات قوادح شميت جهدا عتبة في الدخل، يسمى جهد العتبة الأول جهد العتبة الموجب (positive threshold voltage) ويرمز له (V_{T+})، ويسمى الثاني جهد العتبة السالب ويرمز له (V_{T-}). يبيِّن الشكل (64.12) دارات متكاملة فيها بوابات قوادح شميت والدارات المعطاة في الشكل هي 7414 وتحوي ست عواكس، 74132 وتحوي أربع بوابات NAND بمدخلين لكل بوابة والدارة المتكاملة 7413 وتحوي بوابتي NAND بأربعة مداخل لكل بوابة.

ولفهم آلية عمل هذه البوابات نقارن بوابة عاكس من الدارة المتكاملة 7414 مع عاكس عادي من الدارة المتكاملة 7404. في الدارة المتكاملة 7404 ولكي ينتقل خرج أحد العواكس من high إلى Low أو من Low إلى high فإن جهد الخرج يجب أن يكون أكبر أو أصغر من 2 V، والـــ 2 V هي جهد العتبة الوحيد، أما في العاكس 7414 ولكي ينتقل الخرج من (Low) إلى high يجب أن يكون جهد الدخل أقل من (+0.9 V) والتي تعتبر (V_{T-})، لكي ينتقل الخرج من high إلى Low يجب أن يكون جهد الدخل أكبر من (V_{T+}) والتي تساوي (+1.7 V). يسمى الفرق في الجهد بين (V_{T+}) و(V_{T-}) باسم جهد العروة (hysteresis voltage) (انظر الفصل السابع لمزيد من التفصيلات عن الموضوع) يتعلق الرمز الذي يُشير إلى بوابات قادح شميت بشكل تابع النقل (transfer function) المبيِّن في الشكل (65.12).



الشكل (64.12): نماذج لدارات متكاملة تحوي بوابات قادح شميت.



الشكل (65.12): عاكس عادي وتابع نقله وأشكال إشارات الدخل والخرج، عاكس قادح شميت وتابع نقله وإشارات دخله وخرجه.

تعتبر بوابات قوادح شميت مفيدة جداً لتحويل الإشارات الضجيجيَّة التي تتأرجح حول مستويات عتبة حدية إلى إشارات معرَّفة بشكل حاد وعديمة القفزات، ويتضح ذلك من الأشكال السفلية المبينة في الشكل (65.12) فنلاحظ أن جهد خرج العاكس العادي يحوي قفزات مفاجئة غير مرغوبة ناتجة عن التغيرات في إشارة الدخل حول مستوى (2 V) وهذه التغيرات تهمل نهائياً في عاكس قادح شميت بسبب العروة.

9.4.12 ربط العائلات المنطقيَّة مع بعضها

من المفيد عدم استخدام عدة عوائل منطقية عند بناء منظومة منطقية لأسباب عديدة منها اختلاف المستويات المنطقية للدخل والخرج، واختلاف جهود التغذية، وكذلك اختلاف إمكانيات المخارج على قيادة مداخل البوابات التالية (اختلاف الخرج المروحي) هذا بالإضافة إلى الاختلاف في سرعات العمل فعند استخدام دارات متكاملة بطيئة مع دارات متكاملة سريعة تظهر مشكلة توقيت في الدارة، إلا أن استخدام دارات متكاملة من عوائل مختلفة يكون أحياناً إجبارياً أو حتى مرغوباً.

قد تضطر أحياناً إلى استخدام دارة متكاملة معينة لا تتوفر إلا في إحدى العوائل (كذاكرة مثلاً، أو عداد) كأن تتوفر في عائلة CMOS مثلاً أما باقي الدارات المتكاملة فمن عائلة TTL، كما أن استخدام دارات من عوائل مختلفة شائع الاستخدام عند قيادة الأحمال، فمثلاً تستخدم بوابة TTL ذات خرج مفتوح كأداة ربط بين دارات CMOS والأحمال الخارجية

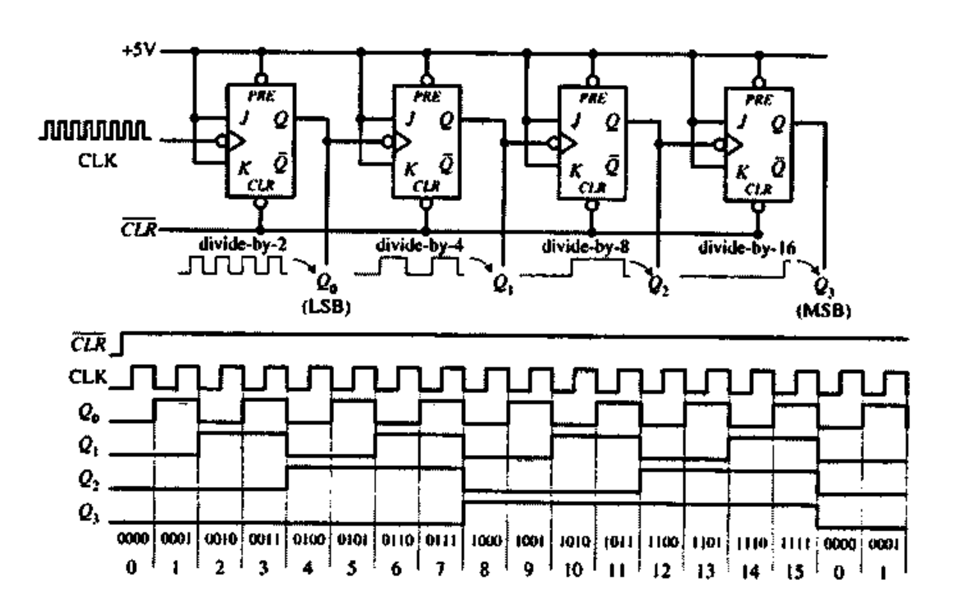
7.6.12 تطبيقات قلابات JK

تستخدم قلابات JK بشكل أساسي في العدادات (Counters) وفي مسجلات الإزاحة (Shift Registers). سنتعرف الآن على استخدام القلاب JK في تطبيقات العدادات، وسنتعرف لاحقاً على أنواع أخرى من العدادات وعلى مسجلات الإزاحة.

العداد الموجي

يمكن تشكيل عداد بسيط، يسمى عداداً موجياً ــ نمط 16 (Mod-16 ripple counter) أو عداداً غير متزامن بوصل أربعة قلابات JK مع بعضها كما في الشكل (89.12) والنمط 16 (MOD-16) أو (modulus 16) تعني أن للعداد 16 حالة ثنائية، وهذا يعني أن بإمكان العداد العد من (0) وحتى (15) ويعتبر الصفر إحدى العدات.

يوصل كل قلاب JK في دارة هذا العداد ليعمل في نمط الانتقال (toggle mode) حيث توصل المداخل J وK مع بعضها وتوصل إلى حالة high وعند تطبيق نبضات Clock على أول قلاب يقوم هذا القلاب بتقسيم التردد على (2) على خرجه (Q_0) ويستقبل القلاب الثاني خرج القلاب الأول على مدخل Clock الخاص به ويقسم نبضات خرج Q_0 على (2) ويظهرها على خرجه Q_1. يتكون خرج العداد من أربعة أرقام (4-digits)، الخانة الأقل أهمية هي (Q_0) والخانة الأكثر أهمية هي (Q_3)، وعندما يصل العدد إلى (1111) يعود العداد إلى (0000) ويكرر عمله من جديد. يمكن تصفير العداد في أي لحظة بوصل مداخل التصفير إلى حالة (Low). يمكن جعل العداد يعمل بالعكس، أي يعد من (1111) إلى (0000) باستخدام المخارج المعكوسة $\bar{Q}$ للقلابات. يمكن استخدام العداد كمقسم على 2 أو 4 أو 8 أو 16، ولتقسيم تردد إشارة ما تطبق الإشارة على مدخل Clock وإذا أردت تقسيمها على (2) فإن الخرج يؤخذ من (Q_0)، أما عندما يؤخذ الخرج من (Q_1) فإن التردد يقسم على (4) وللتقسيم على (8) يؤخذ الخرج من Q_2 (أي تحتاج لثلاثة قلابات).

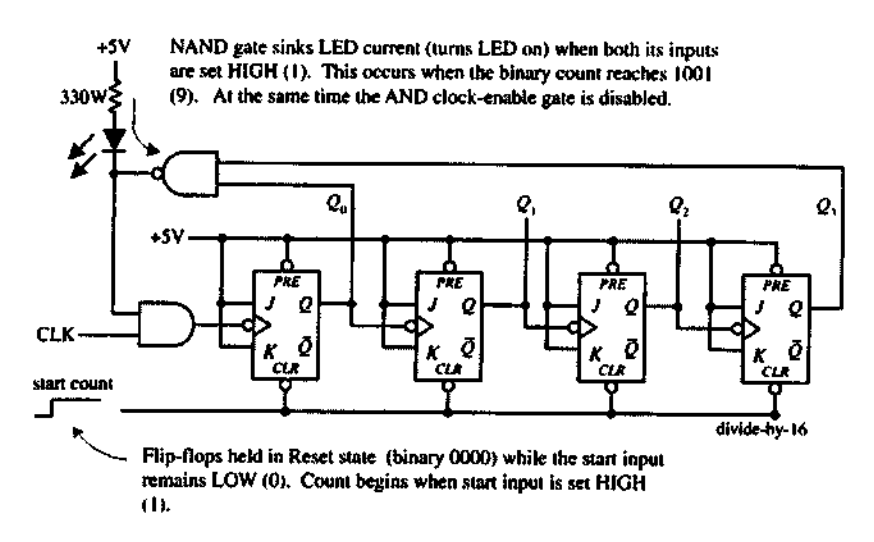


الشكل (89.12) دارة العداد غير المتزامن MOD-16.

يمكن بناء عدادات بــ MOD أعلى (تعد لقيم أعلى من 16) بإضافة قلابات جديدة إلى مخارج العداد السابق. ربما تتساءل كيف يمكن بناء عداد MOD-10، يعد من (0) وحتى (9)؟، أو كيف يمن توقيف العداد عندما يصل العد إلى قيمة محددة وتفعيل جهاز أو دارة عند ذلك العدد كتشغيل رنان (buzzer) أو إضاءة LED؟ تبيِّن الدارة المعطاة في الشكل (12-90) عداد MOD-10. دارة العداد المطلوب تشبه دارة عداد MOD-16 ولكن توصل المخارج (Q_0) و(Q_3) إلى مداخل بوابة NAND كما

في الشكل، وعندما تكون مخارج العداد على الحالة (1001) أي العدد (9) فإن (1 = Q0) و(1 = Q3) ويكون خرج بوابة NAND (0 أو Low) ويمكن لخرج الدارة أن يمتص تياراً مما يسمح للديود LED بالإضاءة، ويتم بنفس الوقت إلغاء تفعيل بوابة تفعيل نبضات Clock ويتوقف العد. عندما يكون خرج بوابة NAND في حالة (high) لا يمر تيار عبر الـــ LED ولا يُضيء.

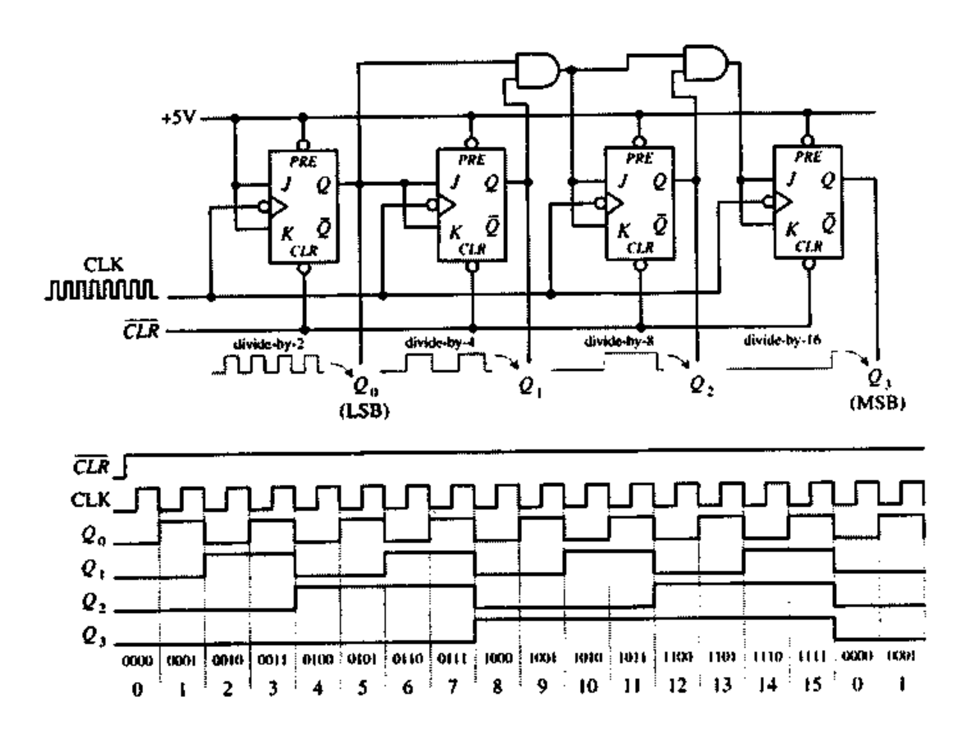
يمكن استئناف عملية العد بوصل مدخل Clear (التصفير) لحظيّاً إلى حالة (Low). تستخدم نفس الدارة والطريقة لتشكيل عداد MOD-15 ولكن توصل المخارج Q1 وQ2 وQ3 في هذه الحالة إلى مداخل بوابة NAND، ويجب أن يكون لبوابة NAND ثلاثة مداخل.



الشكل (90.12): عداد MOD-9.

العداد المتزامن

توجد مشكلة في العداد المشروح سابقاً وهي أن العدادات تحتاج زمناً للاستجابة لتغيرات إشارة Clock، وهذا التأخير الزمني ناتج عن تأخير الانتشار ضمن دارات القلابات. يبلغ زمن تأخير الانتشار لقلاب في عائلة TTL المعياريّة حوالي (30 ns)، وعند وصل أربعة قلابات لتشكيل عداد MOD-16 فإن التأخير يصل إلى (120 ns)، وزمن التأخير هذا قد يقود إلى مشاكل في التوقيت عند استخدام العداد في نظام متزامن عالي الدقة. يمكن تجنب التأخير باستخدام عداد متزامن (synchronous counter). توصل مداخل clock لكافة القلابات في العدادات المتزامنة إلى نبضات Clock، وهذا يعني أن تغيرات خرج كافة القلابات تحدث في نفس الوقت، ولكن هنا تستخدم دارات منطقية بين مخارج القلابات ومداخلها من أجل الحصول على تسلسل العد المطلوب، ولتكوين عداد MOD-16 متزامن نحتاج لبوابتي AND بالإضافة إلى القلابات الأربعة. تعمل بوابات AND على الحفاظ على القلاب في نمط المسك (hold mode) وذلك إذا كانت مداخل بوابة AND في حالة Low، ويعمل القلاب بنمط التبديل (toggle) إذا كانت مداخل AND في حالة high، وهكذا وخلال العد (0-1) يكون القلاب الأول في نمط التبديل (ويكون دوماً كذلك) أما كل القلابات الباقية فتكون في نمط المسك (hold)، وعند زمن العد من (2-4) يكون القلابان الأول والثاني في نمط التبديل أما القلابات الباقية فتكون في نمط المسك وعند العد من (4-8) تمكّن بوابة AND الأولى ويسمح ذلك للقلاب الثالث بالتبديل، أما عند العد من (8-15) فتكون بوابة AND الثانية ممكّنة ويُسمح عندها للقلاب الأول بالتبديل ويمكنك فهم تفصيلات العمل بنفسك من دراسة الدارة ومخططات التوقيت.



الشكل (91.12): عداد MOD-16 متزامن، ومخططات النبضية.

إن العدادات التي تمت مناقشتها سواءً كانت متزامنة أو غير متزامنة توضح مبدأ العمل ولكن ليست هناك حاجة إلى بناء هذه العدادات كما في الأشكال السابقة وكل ما عليك فعله عندما تحتاج عداداً هو أن تشتري دارة متكاملة IC جاهزة للعمل كعداد. تتوفر دارات متكاملة جاهزة للعمل كعداد (MOD-16) مع ميزات إضافية، فالعديد من الدارات المتكاملة للعدادات تسمح لك باختيار العد إلى قيمة محددة عن طريق خطوط دخل تفرعيَّة، أما بعضها الآخر فيتمتع بإمكانية العد التصاعدي (Count-up) أو بالعد التنازلي (Count-down) ويتم اختيار أحد النمطين بواسطة مدخل تحكم. سنتعرف وبتفصيلات أكثر على الدارات المتكاملة للعدادات لاحقاً.

8.6.12 اعتبارات التوقيت العمليَّة في القلابات

من الضروري تجنب مشاكل السَبق (race) عند العمل بالقلابات.

وعلى سبيل المثال يمكن أن تحدث حالة سبق إذا كان عليك أن تطبق جبهة نبضة فعالة في نفس اللحظة التي تطبق فيها نبضات high أو Low على أحد مداخل قلاب JK. وبما أن القلاب JK يستخدم الحالات المنطقية الموجودة على المداخل في اللحظة التي تُطبق فيها جبهة النبضة Clock، فإن حدوث تغيُّر من high إلى Low سوف يسبب مشاكل لأنك لا تستطيع في تلك اللحظة أن تحدد هل الدخل high أو Low؟

ولتجنب هذه المشكلة يجب مسك مداخل القلاب JK على وضعها Low أو high لفترة زمنية تساوي على الأقل (ts) قبل انتقال جبهة نبضة Clock إلى الحالة الفعالة. إذا تغيرت المداخل خلال ts وحتى جبهة النبضة فإن مستوى الخرج سيكون غير موثوق، ولمعرفة (ts) لقلاب يجب العودة إلى نشرات المعطيات وعلى سبيل المثال فإن (ts) لقلابات الدارة المتكاملة 74L576 هي 20 ns. تُعطي الجهات الصانعة بارامترات توقيت أُخرى مثل زمن المسك (hold time)، وتأخير الانتشار، ونبيِّن فيما يلي وصفاً وشرحاً لمعاني هذه البارامترات.

بارامترات توقيت القلابات

مصطلحات هامة

زمن الإعداد setup time ts: هو الوقت اللازم للاحتفاظ بالدخل قبل تطبيق نبضة القدح كي يكون العمل مضموناً. تبلغ قيمة ts للقلابات حوالي 20 ns.

زمن المسك Hold time th. هو زمن الاحتفاظ بمعطيات الدخل بعد تطبيق نبضة Clock (جبهة النبضة) كي يكون العمل مضموناً وقيمة هذا الزمن لأغلب القلابات (0 ns) وهذا يعني أنه لا حاجة لمسك الدخل بعد تطبيق جبهة النبضة Clock.

T_{PLH}: زمن التأخير بين لحظة تطبيق جبهة نبضة Clock ولحظة انتقال الخرج Q من Low إلى High، وقيمة هذا الزمن في القلابات هي تقريباً 20 ns.

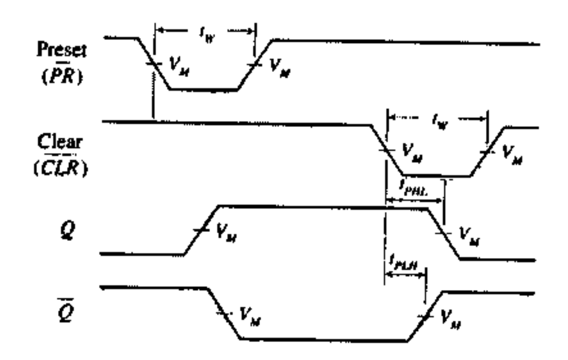
T_{PHL}: زمن التأخير بين لحظة تطبيق جبهة نبضة Clock ولحظة انتقال الخرج Q من High إلى Low ويساوي 20 ns.

f_{max}: التردد الأعظمي المسموح على مدخل Clock، وإذا طبقت نبضات Clock بتردد أعلى من هذا التردد فإن النتيجة ستكون أداءاً غيرُ موثوق، ويمكن أن يكون هذا التردد كبيراً جداً.

tw (L): زمن حالة (Low) في نبضات Clock، وهو العرض الأصفري بالنانو ثانية المسموح أن تكون فيه نبضات Clock بحالة (Low) كي يكون العمل موثوقاً.

* Shaded region indicates when input is permitted to change for predictable output performance.

Preset and Clear to output delays, Preset and Clear pulse widths



الشكل (92.12): أشكال توضح أزمنة التأخير.

tw (H): عرض نبضة Clock، وهو العرض الأصفري مقدراً بالنانو ثانية لنبضات Clock والذي تكون فيه النبضة في حالة High كي يكون العمل موثوقاً.

عرض نبضة Clear أو Preset ويُرمز له بـــ (tw (L)، وهو العرض الأصفري (بالنانو ثانية) لنبضة Low التي تطبق على مداخل التصفير Clear والوضع القسري Preset.

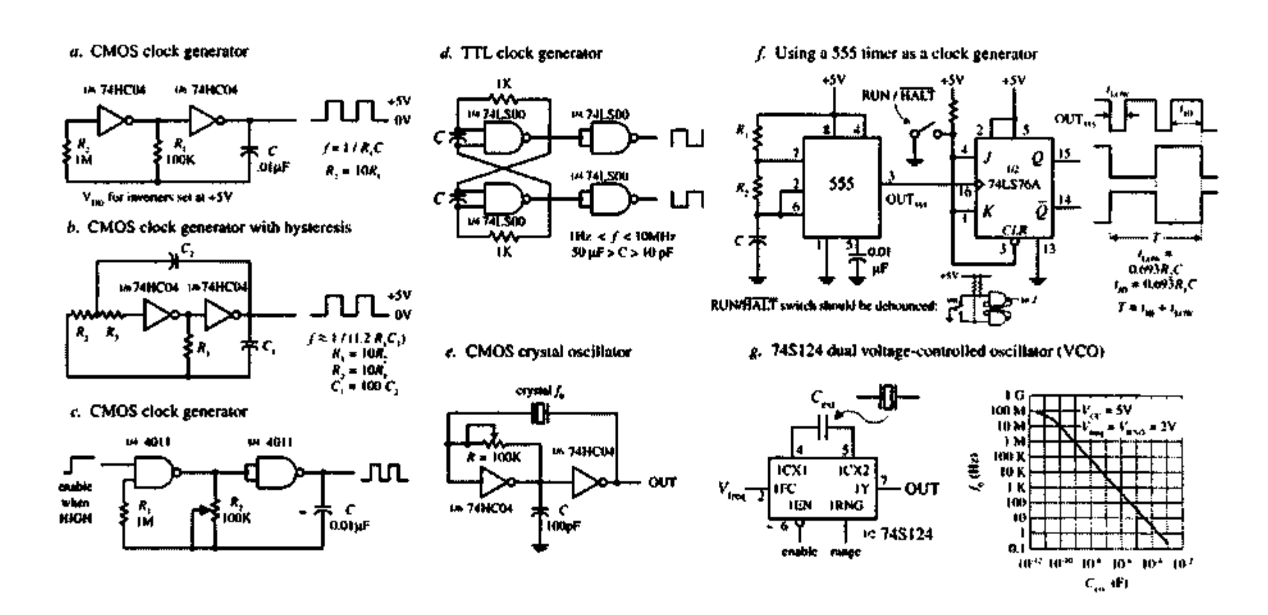
يبيِّن الشكل (92.12) أشكالاً توضح التأخير بين لحظة تطبيق حافة أو جبهة النبضة Clock ولحظة تغير وضع جهد الخرج، أزمنة مسك وإعداد المعطيات، وعرض نبضة Clock، بالإضافة إلى تأخير التصفير والوضع القسري وعرض نبضات التصفير والوضع القسري.

9.6.12 مولدات نبضات Clock الرقميّة ومولدات النبضة الوحيدة

لابد أنك لاحظت أهمية نبضات Clock والنبضة الوحيدة كإشارات تحكم، وسنتعرف الآن على بعض الدارات التي تولد هذه النبضات.

مولدات نبضات Clock (المهتزات عديمة الاستقرار)

مولد نبضات Clock هو ببساطة هزاز يُعطي في خرجه نبضات مربعة، وقد ناقشنا في الفصل التاسع طرق توليد الموجات المربعة وبإمكانك العودة إلى ذلك الفصل للتعرف على مبادئ عمل هذه المولدات، وسنبيِّن هنا فقط بعض الدارات العملية وكما تلاحظ منها فإن نبضات Clock يمكن توليدها باستخدام عناصر منفصلة كالبوابات المنطقية والمكثفات والمقاومات والكريستالات (Crystals)، أو يمكن شراء مولدات النبضات كدارات متكاملة جاهزة. يبيِّن الشكل بعضاً من مولدات النبضات.



الشكل (93.12): نماذج من دارات مولدات النبضات.

الشكل a: تستخدم في هذا الشكل بوابتا عاكس نوع CMOS ومقاومتان ومكثفة لتكوين هزاز استرخاء RC يُعطي في خرجه نبضات مربعة ويتعلق تردد هذه النبضات بالثابت الزمني RC ويحسب من المعادلة $f = 1/R_1C$ ويتم اختيار $R_2 = 10R_1$.

الشكل b: توجد مشكلة في الشكل (a) فمن الممكن أن لا تهتز الدارة إذا كان هناك فرق بين مناطق العبور (transition regions) للبوابات، أو قد تهتز على تردد أخفض من التردد الذي يُحسب من المعادلة وذلك بسبب الربح المنتهي للبوابة اليساريَّة، وتحل دارة الشكل (b) هذه المشاكل بتحقيق عروة (hysteresis) عن طريق إضافة مقاومة ومكثف إضافيين.

الشكل c: دارة مولد نبضات مربعة باستخدام بوابات NAND نوع CMOS ودارة RC، ويوجد في الدارة مقاومة متغيرة لضبط التردد. يمكن توليد تردد قيمته الأعظمية 2 MHz بواسطة هذه الدارة. توصل إشارة تمكين إلى المدخل الثاني للبوابة الأولى وتمكن الدارة عندما يكون مدخل التمكين في حالة (High).

الشكل d: يستخدم قلاب SR نوع TTL مع مقاومتي تغذية عكسية وتوصيلة تشبه هزاز الاسترخاء لتوليد نبضات مربعة. يتحدد تردد النبضات بالثابت الزمني RC ويتغير دور المشغولية بتغيير نسبة (C_1) إلى (C_2).

الشكل e: تبيِّن الدارة هزازاً كريستالياً لتأمين استقرار عالٍ، وهذا ضروري جداً لنبضات Clock ويوجد في الدارة عاكسان وكريستال كعنصر تغذية عكسيَّة (انظر الفصل الثامن). يتحدد تردد الاهتزاز بتردد الكريستال (كمثال يمكن أن يكون تردد الكريستال 2 MHz أو 10 MHz). توجد في الدارة مقاومة متغيرة وضبط هذه المقاومة ضروري من أجل نشوء الاهتزاز.

الشكل f: تستخدم دارة 555 وقلاب JK للحصول على نبضات فيها ($t_{off} = t_{on}$) وكذلك لخلق إمكانية للتحكم بتمكين Clock.

توضح الأشكال الموجودة مع الشكل فكرة عن عمل الدارة.

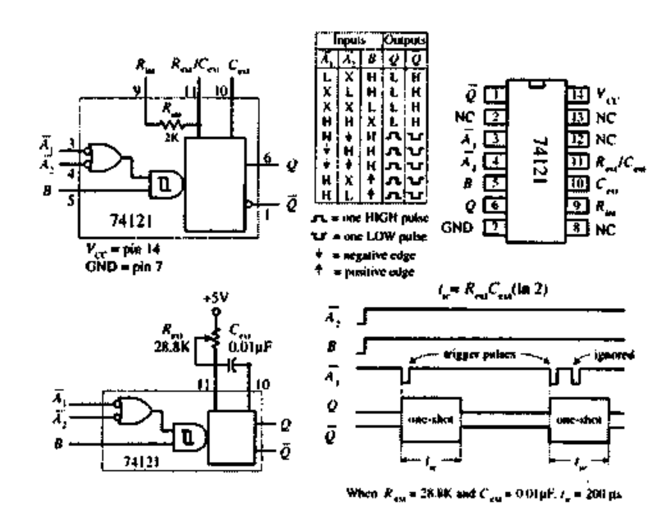
الشكل g: وهو عبارة عن دارة متكاملة 74LS124 تحوي مولدي نبضات مربعة ويمكن التحكم بتردد هذه النبضات جهدياً VCO. يتعلق تردد الخرج (f_{out}) بجهد الدخل (V_{in}) وبالمكثف (C). يبيّن المنحني علاقة التردد بالسعة (C) عند قيم ثابتة لـــ (V_{RNG}) ولـــ (V_{in}) وتساوي (2 V). للدارة مدخل تمكين وهذا المدخل فعال في حالة (Low). توجد دارات متكاملة VCOs أخرى يمكن استخدامها كمولدات Clock مثل 74LS624، 4024 و4046 والدارة الأخيرة هي دارة إقفال صفحي (PLL) وتوجد في الكتالوكات أنواع أخرى.

وحيدات الاستقرار Monostables (one-shots) (وحيدات الإطلاق)

يمكن استخدام المهتز وحيد الاستقرار لتوليد نبضة وحيدة بعرض معيّن، وتسمى دارة وحيد الاستقرار بدارة وحيد الإطلاق (one-shot).

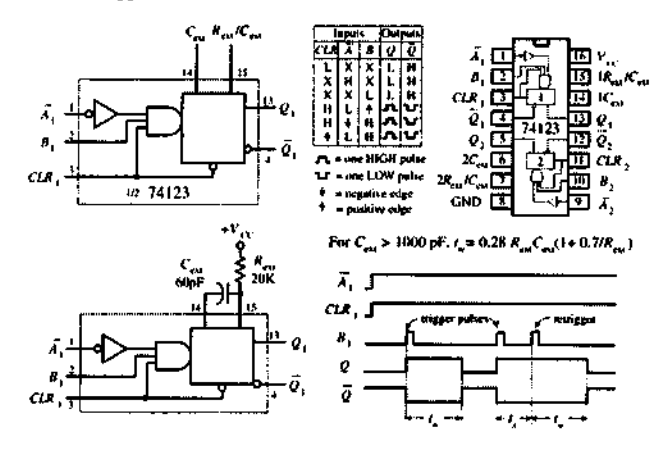
ودارة وحيد الاستقرار لها حالة استقرار واحدة (high) أو (Low) وتقدح الدارة كي تنتقل إلى حالتها غير المستقرة وتبقى فيها فترة من الزمن تتعلق بالثابت الزمني RC للدارة. يمكن تشكيل دارة وحيد استقرار باستخدام بوابات بسيطة ومقاومة ومكثف، ولن نتعرض لهذه الأنواع من دارات وحيد الاستقرار. تتوفر دارات متكاملة ICs تستخدم كمولد وحيد الاستقرار كالدارة المتكاملة 74121 والتي تسمى nonretriggerable monostable (وحيد استقرار غير قابل لإعادة القدح)، والدارة 74123 وهي دارة وحيد استقرار قابل لإعادة القدح.

للدارة المتكاملة 74121 ثلاثة مداخل قدح $\overline{A}_1$، $\overline{A}_2$ وB وخرج صحيح Q وخرج معكوس $\overline{Q}$ ومداخل توقيت توصل إليها دارة RC (R_{ext}/C_{ext}) أو C_{ext}، وتوجد خمس تشكيلات مختلفة لقدح الدارة كما هو مبيَّن في جدول الحقيقة وعند التعامل مع إشارات قدح ذات زمن صعود كبير نسبياً أو إشارات ضجيجية فمن الأفضل استخدام مدخل القدح B حيث تطبق إشارة القدح على بوابة قادح شميت. يتم تحديد عرض نبضة الخرج (t_w) بوصل عناصر خارجية كما في الشكل إلى المداخل C_{ext}؛ R_{ext}/C_{ext}. توجد في الدارة المتكاملة مقاومة داخلية 2 kΩ ويمكن استخدام هذه المقاومة بوصل النقطة (g) إلى (V_{cc}) ووصل مكثف بين الأرجل (10) و(11) أو يمكن أن توصل مع مقاومة خارجية وصلاً تسلسلياً عند وصل المقاومة الخارجية بين (g) و($+V_{cc}$).



$\overline{A}_1$	$\overline{A}_2$	B	Q	$\overline{Q}$
L	X	H	L	H
X	L	H	L	H
X	X	L	L	H
H	H	X	L	H
H	↓	H	⎍	⎎
↓	H	H	⎍	⎎
↓	↓	H	⎍	⎎
H	X	↑	⎍	⎎
H	L	↑	⎍	⎎

74123 retriggerable monostable multivibrator (one-shot)



CLR	$\overline{A}$	B	Q	$\overline{Q}$
L	X	X	L	H
X	H	X	L	H
X	X	L	L	H
H	L	↑	⎍	⎎
H	↓	H	⎍	⎎
↑	L	H	⎍	⎎

الشكل (94.12): دارة 74121 (وحيد الاستقرار) وجدول حقيقتها دارة 74123 وجدول الحقيقة.

القيمة العظمى لـــ (t_w) يجب أن لا تزيد عن (28 s)، وتحسب العناصر التي تؤمن عرض النبضة المطلوب من العلاقة $t_w = R_{ext}.C_{ext}(\ln 2)$.

ويتم الحصول على عرض النبضة الأعظمية 28 s إذا كانت R = 40 k و C = 1000 µF. في الدارة غير القابلة لإعادة القدح لا يؤثر تطبيق نبضات القدح على الدارة نهائياً عندما تكون الدارة في حالتها غير المستقرة.

تحوي الدارة المتكاملة 74123 على وحيدي استقرار كل واحد منهما قابل لإعادة القدح (retriggerable)، وهنا لا تهمل نبضات القدح التي تُطبق على الدارة وهي في الحالة غير المستقرة وبدلاً من ذلك فإن ورود نبضة قدح إلى الدارة وهي في حالتها غير المستقرة يجعل خرجها يبقى في حالة غير مستقرة لفترة زمنية تساوي (t_w) اعتباراً من لحظة القدح.

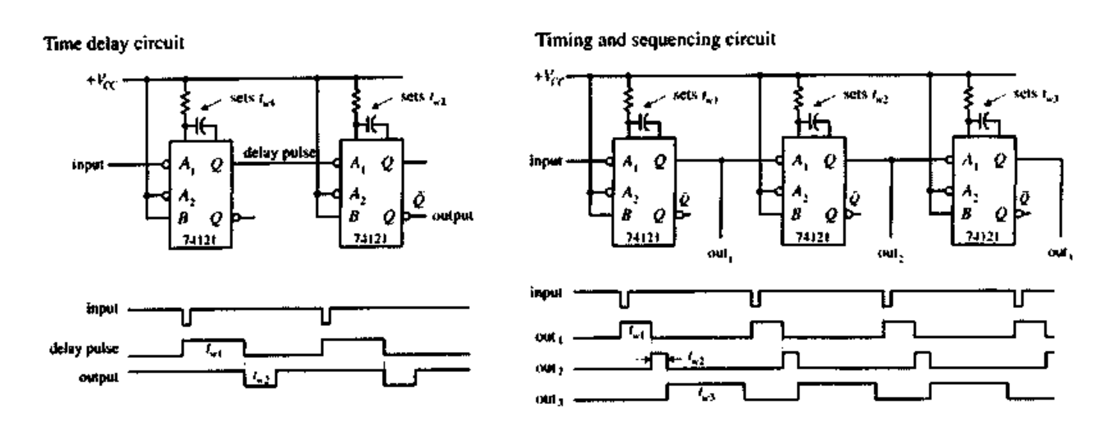
للدارة 74123 مدخلا قدح ($\overline{A}$ و B) ومدخل تصفير CLR. عندما يكون CLR في حالة Low تجبر الدارة على العودة إلى حالة الاستقرار (Q = Low)، ولتحديد عرض نبضة الخرج (t_w) تستخدم المعادلة

$$t_w = 0.28\ R_{ext}\ .\ C_{ext}\ .\ (1 + 0.7/R_{ext})$$

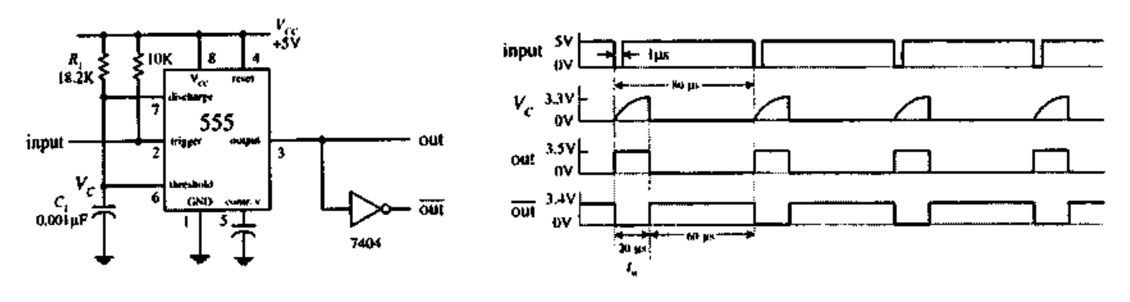
وذلك بفرض أن $C_{ext} > 1000$ pF، أما إذا كانت $C_{ext} < 1000$ pF عندها يجب استخدام المنحنيات البيانية التي تقدمها الجهة الصانعة والتي تمكنك من معرفة t_w إذا كانت العناصر R_{ext}/C_{ext} معلومة أو بالعكس.

يمكن استخدام دارات وحيد الإطلاق كمولدات تأخير زمني (time-delay generators) أو كدارات توقيت وتتابع (timing and sequencing) كما في الشكل (95.12).

إذا لم تتوفر لديك دارة متكاملة 74121 (وحيد استقرار) يمكنك استخدام دارة (555) بتوصيلة وحيد استقرار كما في الشكل (96.12) وقد درست دارات الـ 555 في الفصل الثامن، فإذا أردت المزيد من التفصيلات عن دارات الـ 555 ننصحك بالعودة إليه.



الشكل (95.12): دارات وحيد استقرار كمولدات تأخير وتوقيت.



الشكل (96.12): دارة 555 كوحيد استقرار وإشارات خرجها.

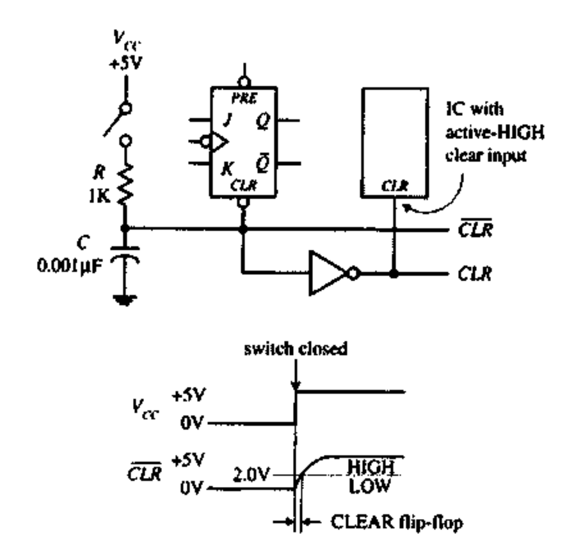
مولد Clock دائم/وحيد إطلاق

تبين دارة الشكل (97.12) دارة مولد Clock دائم وحيد إطلاق، وهذه الدارة مفيدة جداً عند اختبار الدارات المنطقية، وفيما يلي شرح مفصل لآلية عمل الدارة. يحدِّد المفتاح (S2) فيما إذا كان المطلوب إظهار نبضة وحيدة أو نبضات Clock دائمة على خرج الدارة، وعندما يكون المفتاح S2 في وضعية single-step تكون مخارج القلاب SR (المستخدم هنا كمانع ارتداد مفتاح) في حالة $\overline{Q} = 0$ ؛ $Q = 1$ وهذا يؤدي إلى إلغاء تمكين بوابة NAND ذات الرمز (B) وإلى تمكين البوابة (A) وبذلك يسمح لنبضة وحيدة بالمرور عبر البوابة (A) إلى بوابة الخرج (C). يُقدح وحيد الإطلاق بضغط المفتاح S1. أما عندما يوضع المفتاح (S2) على وضع Continuous فإن مانع ارتداد المفتاح يُرجع إلى حالة $\overline{Q} = 1$ ؛ $Q = 0$ وتمكن البوابات A وB ولذلك تتمكن إشارة Clock المولدة بواسطة دارة (555) من المرور عبر (B) إلى البوابة (C) وتظهر على الخرج. تستخدم البوابة (C) لمنع الخرج من أن يكون Low وhigh في نفس الوقت.

الشكل (97.12): دارة مولد Clock دائم/وحيد استقرار.

10.6.12 دارات تصفير آلية عند وصل التغذية

من المفيد في الدارات التتابعية تصفير مخارج كافة الدارات عند وصل التغذية إلى الدارة، لأن ذلك يضمن بدء العمل من الصفر للجميع فمثلاً وبدون دارة تصفير يمكن أن تبدأ دارة IC مستخدمة كعداد العد من (1101) بدلاً من أن تبدأ العد اعتباراً من (0000). وفيما يلي نتعرف على بعض الطرق المستخدمة للتصفير الآلي لحظة وصل التغذية.



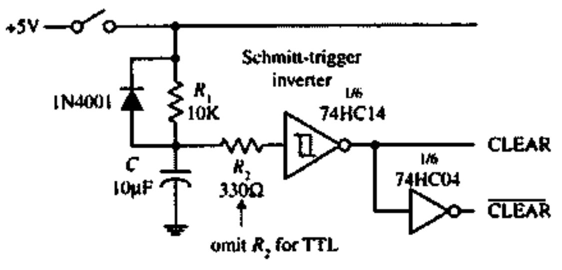
الشكل (98.12): دارة تصفير آلي.

لنفرض أن لديك أحد العناصر في الدارة يحوي قلاب JK، وأن هذا القلاب يحتاج لتصفير لحظة وصل التغذية. ومن أجل تصفير القلاب والعودة بسرعة إلى العمل بالنمط المتزامن يجب تطبيق نبضة Low على مدخل تصفير القلاب ثم العودة بالجهد على مدخل التصفير إلى حالة (high) أو على الأقل إلى 2 V في قلابات الدارة 74L576 مثلاً. يمكن تحقيق هذا العمل ببساطة باستخدام دارة RC كالدارة المبينة في الشكل (98.12). عندما يكون مفتاح التغذية في حالة (off) يكون المكثف غير مشحون (0 V) ويكون خط التصفير في حالة (Low)، $\overline{CLR}$ = Low. عند إغلاق المفتاح يبدأ المكثف بالشحن إلى Vcc (+5 V) ويعتبر $\overline{CLR}$ = Low حتى يصبح جهد المكثف مساوياً 2 V. وبعد زمن يساوي RC يصل جهد المكثف إلى (63 %) من جهد التغذية أي إلى (3.5 V)، وبعد زمن

t = 5 RC يصل جهد المكثف تقريباً إلى (Vcc) وبما أن قلابات الدارة 74LS76 تحتاج لجهد 2 V على مدخل التصفير كي تعود إلى حالة العمل المتزامن تلاحظ أن اختيار t = RC يكفي لتحقيق هذا الجهد فإذا أردت مثلاً أن تعود الدارة إلى حالة العمل المتزامن بعد 1 µs من تغذية الجهاز نعوِّض في العلاقة:

$t = RC \Rightarrow 1\ \mu s = R.C$

نختار R = 1 kΩ فتكون C = 0.001 µF. تستخدم دارة التصفير الآلي في الدارات التي تحوي دارات متكاملة ICs قابلة للتصفير. إذا كانت الدارة المتكاملة تتطلب أن يكون التصفير فعالاً في حالة (high)، وهذا غير شائع يستخدم عاكس لتشكيل إشارة تصفير فعالة في حالة high (انظر الشكل 98.12). ذكرنا أن فترة استمرارية خط التصفير في حالة Low هي حوالي (1 µs)، ولكن عند زيادة عدد الدارات الموصولة مع خط التصفير فإن هذا الزمن سوف ينخفض بسبب مسارات الشحن الإضافية ولمنع ذلك من الحدوث يستخدم مكثف أكبر.



الشكل (99.12): دارة تصفير آلي محسَّنة.

تُعطى في الشكل (99.12) دارة تصفير آلي محسنة ويستخدم فيها عاكس من نوع قادح شميت لجعل إشارة التصفير تنتقل إلى حالة off بشكلٍ دقيق، وعند استخدام عواكس من نوع قادح شميت من عائلة CMOS يصبح من الضروري استخدام ديود ومقاومة دخل R_2 لحماية الدارة المتكاملة CMOS IC عند فصل التغذية.

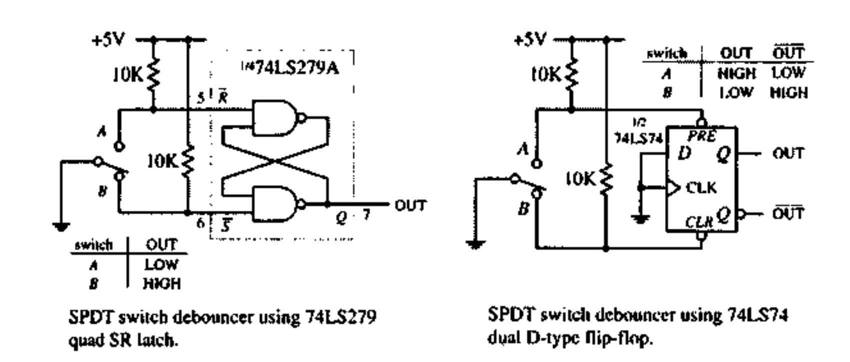
11.6.12 المزيد من المعلومات عن مانع ارتداد المفتاح

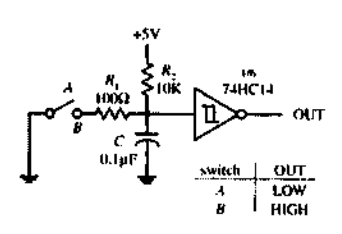
إن دارة الشكل (100.12) هي دارة مانع ارتداد مفتاح مألوفة. تتكون هذه الدارة من قلاب SR يعمل على بوابات NAND وفي الشكل تستخدم الدارة المتكاملة 74LS269A التي تحوي بداخلها أربعة ماسكات SR، وتعتبر مناسبة جداً للاستخدام في الدارات التي تحتاج لأكثر من مانع ارتداد مفتاح. يمكن استخدام أي قلاب قديم مزود بمداخل Clear وPreset كمانع ارتداد، والدارة الموجودة في وسط الشكل (100.12) توضح ذلك، حيث يستخدم قلاب 74LS74-D مع مقاومات شد كمانع ارتداد. يوصل مدخل D ومدخل Clock مع بعضهما ويوصلان مع الأرض وبذلك فإن مداخل Clear وPreset هي الوحيدة التي تؤثر على القلاب وتعمل مقاومات الشد على جعل أحد المداخل Clear أو Preset في حالة high بغض النظر عن ارتداد المفتاح الميكانيكي أو عدم ارتداده.

ويبيِّن جدول الحقيقة المعطى في الشكل وضعيات المفتاح وحالات الخرج الموافقة لها. تُعطى في الشكل (100.12)، القسم اليميني طريقة أخرى لمنع ارتداد مفتاح SPST باستخدام عاكس (قادح شميت) مع دارة توقيت RC. عندما يكون المفتاح (off) يكون المكثف مشحوناً شحناً كاملاً (+5 V) والخرج Out = Low وعند وصل المفتاح يفرِّغ المكثف بسرعة إلى الأرض عبر المقاومة (100 Ω) فينتقل الخرج إلى حالة high، عندما يرتد المفتاح عند وصله يحاول المكثف إعادة الشحن عبر المقاومة (10 kΩ) من الجهد (+5 V) ولكنه يفرغ بسرعة إلى الصفر عبر المقاومة 100 Ω ولكن قيمة المقاومة R_2 الأكبر بكثير من R_1 تجعل الجهد على المكثف خلال فترة ارتداد المفتاح أقل من جهد العتبة الموجب للعاكس (V_{T+}) ولذلك يبقى الخرج (out = high) ولا يؤثر ارتداد المفتاح عليه نهائياً. الثابت الزمني لشحن المكثف هو:

$\tau = R_2 . C = 10\ k\Omega \times 0.1\ \mu F$

عند فصل المفتاح يُشحن المكثف إلى (+5 V) وخلال عملية الشحن وعندما يزيد جهد المكثف قليلاً عن (V_{T+}) ينتقل الخرج إلى حالة (Low).





SPDT switch debouncer using 74LS279 quad SR latch.

SPDT switch debouncer using 74LS74 dual D-type flip-flop.

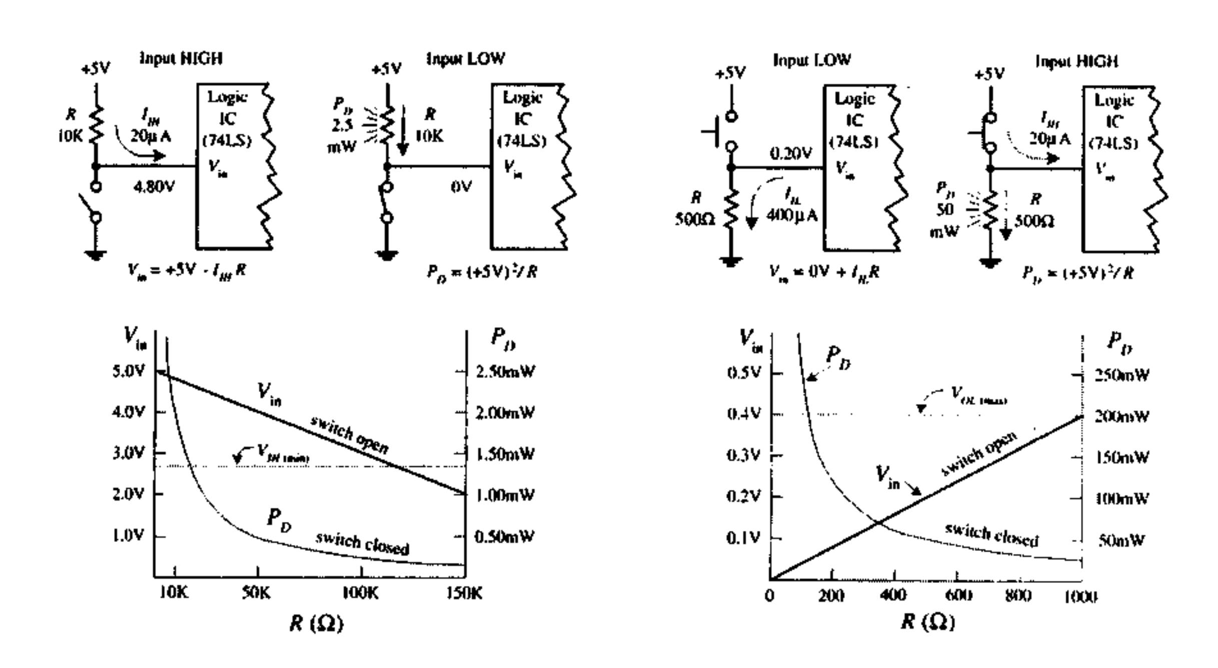
SPST switch debouncer using 74HC14 hex Schmitt-triggered inverter.

الشكل (100.12): دارات مانعات ارتداد مفاتيح.

12.6.12 مقاومات الشد، والربط مع الأرض

تستخدم مقاومة الشد كما لاحظت في دارة مانع ارتداد المفتاح للحفاظ على مدخل ما في حالة high ولولا هذه المقاومة يبقى المدخل عائماً.

وعند الرغبة في نقل هذا المدخل إلى حالة Low يستخدم مفتاح، ومن المفيد والضروري معرفة قيمة المقاومة التي يجب استخدامها كمقاومة شد.



الشكل (101.12): استخدام مقاومات الشد والوصل مع الأرض.

عند حساب قيمة مقاومة الشد من الضروري أن تكون قيمة المقاومة صغيرة كي لا يهبط عليها جهد كبير قد يؤدي إلى انخفاض جهد المدخل إلى ما دون العتبة التي تعتبر high، وبنفس الوقت يجب أن لا تكون المقاومة صغيرة جداً لأنه وعند وصل المفتاح سيمر تيار كبير عبرها إلى الأرض وتبدد بذلك استطاعة عالية.

تستخدم في دارة الشكل السابق مقاومة شد 10 kΩ ويمكن اختبار هذه القيمة فيما إذا كانت تؤثر على جهد المدخل وتنخفض إلى ما دون عتبة الجهد high من العلاقة التالية:

$V_{in} = +5\ V - I_{IH} . R$

I_{IH}: تيار مدخل الدارة المتكاملة عندما يكون الدخل High، وفي دارات 74LS يكون $I_{IH} = 20\ \mu A$ وبذلك نجد أن:

$V_{in} = +5\ V - (20\ \mu A)\ (10\ k\Omega) = 4.80\ V$

تعطى في الشكل منحنيات V_{in} بدلالة (R) وكذلك P_D بدلالة R، وكما تلاحظ من الشكل، إذا أصبحت R كبيرة جداً فإن V_{in} ينخفض إلى ما دون (V_{IHmin}) ولا ينتقل الخرج إلى high كما هو مدروس ومخطط.

كذلك إذا انخفضت R كثيراً فإن تبديد الاستطاعة يرتفع، ومن أجل تحديد قيمة (R) المستخدمة مع دارة متكاملة عليك معرفة (V_{IHmin}) و(I_{IHmax}) من نشرة المعطيات وتطبيق العلاقة السابقة، وفي أغلب التطبيقات يمكن استخدام مقاومة 10 kΩ. في بعض الحالات يكون من الضروري استخدام مقاومة موصولة بين المدخل والأرض لإبقاء المدخل في حالة (Low) وتسمى هذه المقاومة (pulldown resistor)، وبعكس مقاومات الشد فإن مقاومة الوصل مع الأرضي يجب ان تكون صغيرة لأن تيار الدخل (I_{IL}) الذي يصدر عن الدارة المتكاملة أكبر بكثير من (I_{IH})، وعادة تكون قيم مقاومات الوصل مع الأرض بين (100 Ω) و(1 kΩ)، والقيم المنخفضة لمقاومات الوصل مع الأرض تضمن دخل (Low) وللتأكد من ذلك استخدم المعادلة:

$V_{in} = I_{IL} . R$

فمثلاً تكون I_{IL} مساوية 400 μA في الدارات المتكاملة من عائلة 74LS وإذا كانت R = 500 Ω فإن:

$V_{in} = (400\ \mu A)\ (500\ \Omega) = 400 \times 10^{-6} \times 500 = 0.2\ V$

وهي فعلاً أصغر من ($V_{ILmax} = 0.8\ V$) لعائلة 74LS. عند إغلاق المفتاح تبدد استطاعة على المقاومة قدرها:

$P_D = V^2/R = (5\ V)^2/(500\ \Omega) = 50\ mW$

تعطى في الشكل (101.12) منحنيات لـــ V_{in} كتابع لـــ R وكذلك لـــ P_D كتابع لـــ R وكما تلاحظ إذا ارتفعت قيمة R فإن V_{in} يزيد عن V_{ILmax} وبانخفاض R يزداد تبديد الاستطاعة. عند استخدام مقاومة وصل مع الأرض مع مفتاح كما في الشكل يجب الانتباه كثيراً إلى تبديد الاستطاعة عند إغلاق المفتاح.

7.12 الدارات المتكاملة للعدادات

بينا في فقرة سابقة كيفية استخدام القلابات لتكوين عدادات متزامنة وغير متزامنة، وفي الحالات العملية وبدلاً من استخدام قلابات منفصلة لتكوين عدادات، تستخدم دارات متكاملة جاهزة مصممة للعمل كعدادات.

تؤمن الدارات المتكاملة المصممة للعمل كعدادات ميزات إضافية مثل مداخل التحكم بالتمكين والتحميل المتوازي (parallel loading) وغيرها. تتوفر أنواع عديدة من الدارات المتكاملة للعدادات المتزامنة وغير المتزامنة.

وهي مصممة للعد بالنظام الثنائي (binary) أو بنظام ثنائي مرمّز عشرياً (binary-Coded Decimal (BCD).

1.7.12 الدارات المتكاملة للعدادات غير المتزامنة

تعمل العدادات غير المتزامنة بشكلٍ جيد في العديد من التطبيقات غير حدية المتطلبات، ولكن العدادات المتزامنة أفضل منها للتطبيقات عالية التردد التي تتطلبُ توقيتاً دقيقاً. تذكر أن نبضات Clock في العدادات المتزامنة تطبق في نفس الوقت على كافة مداخل clock للقلابات ولذلك لا يوجد تراكم في دارة العداد لزمن تأخير الانتشار كما هي الحال في العدادات غير المتزامنة. نتعرف فيما يلي على بعض الدارات المتكاملة التي تجدها في الكتالوكات للعدادات غير المتزامنة.

العداد 7493 لـ 4 Bit

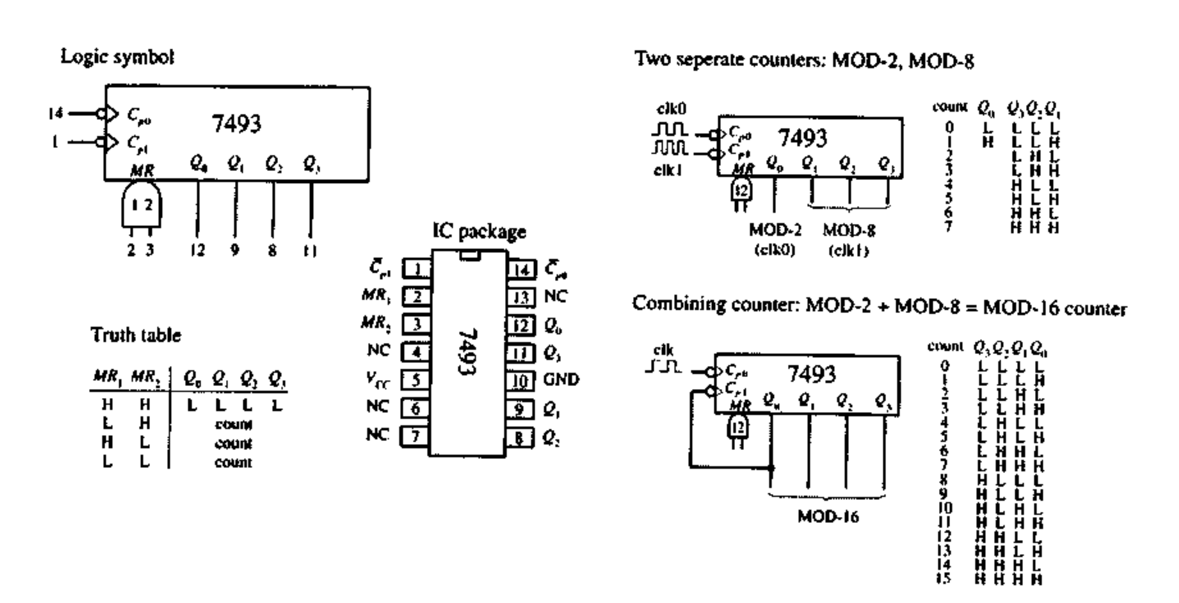
تتكون البنية الداخلية للدارة المتكاملة 7493 من أربعة قلابات JK موصولة للعمل كعدادات منفصلة MOD-2 (العد من 0 إلى 1) وMOD-8 (العد من 0 إلى 7) وتطبق نبضات Clock على هذه العدادات على مداخل مستقلة لكل واحد منها فمدخل Clock لعداد MOD-2 هو المدخل (C_{P0}) ولعداد MOD-8 هو المدخل (C_{P1})، وكذلك فإن مخارج العدادات مستقلة عن بعضها فخرج عداد MOD-2 هو (Q_0) أما مخارج عداد MOD-8 فهي Q_1، Q_2 وQ_3. يمكن استخدام عداد الـــ MOD-2 كمقسم تردد على 2، أما عداد الـــ MOD-8 فيمكن استخدامه كمقسم تردد على (2) للخرج Q_1 وعلى (4) للخرج Q_2 وعلى 8 للخرج Q_3. عند الرغبة في تكوين عداد MOD-16 يوصل العدادان مع بعضهما بوصل الخرج Q_0 إلى (C_{P1}) ويستخدم (C_{P0}) كمدخل clock وحيد. يمكن تصفير مخارج عدادات الـــ MOD-2 والـــ MOD-8 والـــ MOD-16 بجعل مداخل بوابة AND وهي MR1 وMR2 في حالة (High) ولبدء العد عليك تطبيق Low على أحد مداخل بوابة الصفير.

يتقدم العد خطوة واحدة مع الجبهة الهابطة (الجبهة السالبة) لنبضة Clock، وعند الوصول إلى القيمة العظمى للعد وهي (1) في عداد (MOD-2) و(111) في عداد الـــ MOD-8، و(1111) في عداد الـــ (MOD-16) يقفز الخرج إلى الصفر ويبدأ العد من جديد.

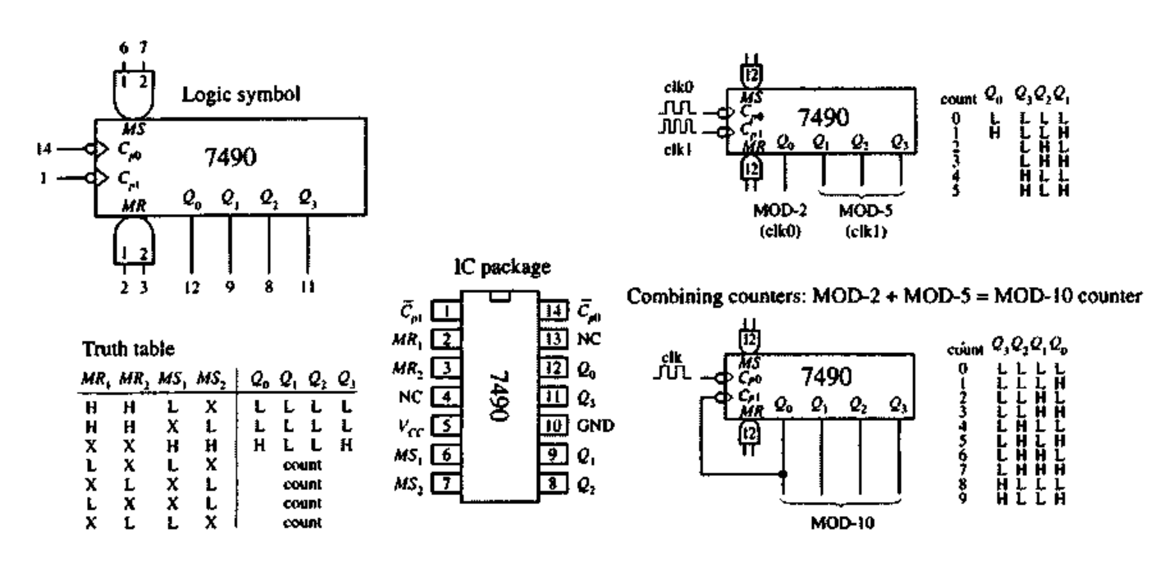
العداد 7490

العداد 7490 هو أيضاً عداد غير متزامن (4 bit) وقلاباته الداخلية موصولة للعمل كعدادات (MOD-2) يعد حتى (2) وعداد MOD-5 يعد حتى (5) ولكل قسم دخل Clock خاص به ويرمز لدخل Clock في عداد الـــ MOD-2 بالرمز C_{P0} وفي عداد MOD-5 بالرمز C_{P1}.

يمكن بوصل الخرج Q_0 إلى C_{P1} تكوينٍ عداد MOD-10 ويجب في هذه الحالة استخدام (C_{P0}) كمدخل لنبضات Clock ويسمى العداد في هذه الحالة عداداً عشرياً (decade counter) أو عداد BCD. عند وصل مداخل التصفير (Master Reset Inputs) - MR1 وMR2 مع جهد (high) تُصفر مخارج العدادات، وذلك بفرض أن المدخلين MS1 وMS2 ليسا معاً في حالة (high). عندما تكون المداخل MS1 وMS2 في حالة high تكون المخارج كما يلي: $Q_3 = 1$، $Q_2 = 0$، $Q_1 = 0$، $Q_0 = 1$ وعند العمل كعداد MOD-10 فإن خرج العداد يجبر في هذه الحالة على خرج يساوي (9) ـــ يقابلها بالنظام الثنائي 1001 ـــ ويستفاد من هذه الميزة إذا أردت العد بدءاً من الصفر (0000) بعد الانتقال لأول نبضة Clock، وعندما تكون مداخل التصفير فعالة MR1 وMR2 يبدأ العد بـــ (0001).



الشكل (102.12): العداد غير المتزامن 7493.

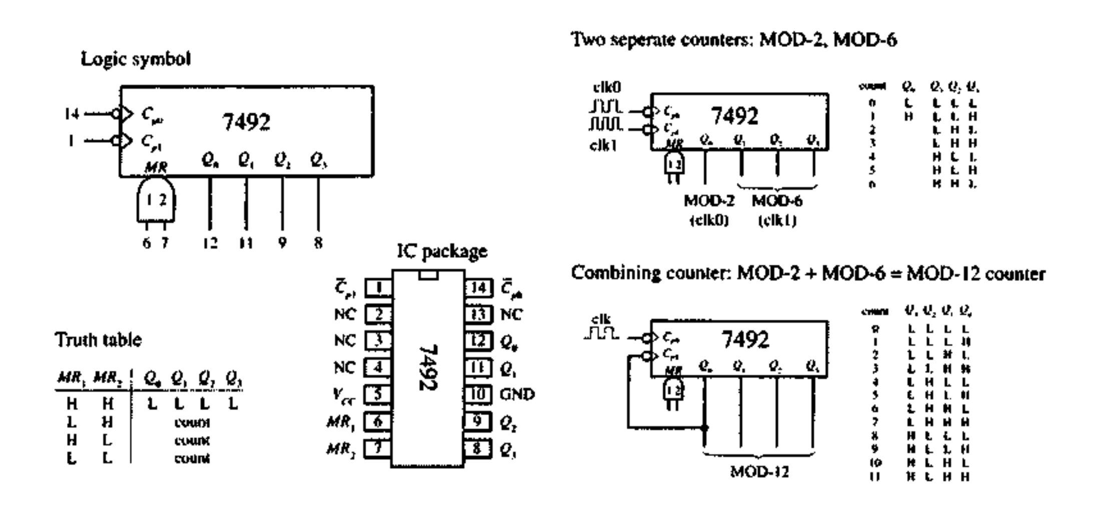


MR_1	MR_2	MS_1	MS_2	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3
H	H	L	X	L	L	L	L
H	H	X	L	L	L	L	L
X	X	H	H	H	L	L	H
L	X	L	X	count			
X	L	X	L	count			
L	X	X	L	count			
X	L	L	X	count			

الشكل (103.12): العداد 7490، شكل الدارة المتكاملة وجدول الحقيقة.

العداد 7492

الدارة المتكاملة 7492 هي نموذج آخر لدارات العدادات غير المتزامنة، وتتكون من قسمين الأول (MOD-2) والثاني (MOD-6) بمداخل Clock ‏(CP0) و(CP1) على الترتيب وبوصل القسمين مع بعضهما عن طريق وصل الخرج (Q0) مع (CP1) يتم الحصول على عداد MOD-12 وتعمل (CP0) كمدخل Clock وحيد. تُصفر مخارج العداد بجعل MR1 وMR2 بحالة (High).



MR_1	MR_2	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3
H	H	L	L	L	L
L	H	count			
H	L	count			
L	L	count			

الشكل (104.12): شكل دارة العداد 7492 المتكاملة وجداول الحقيقة.

2.7.12 الدارات المتكاملة للعدادات المتزامنة

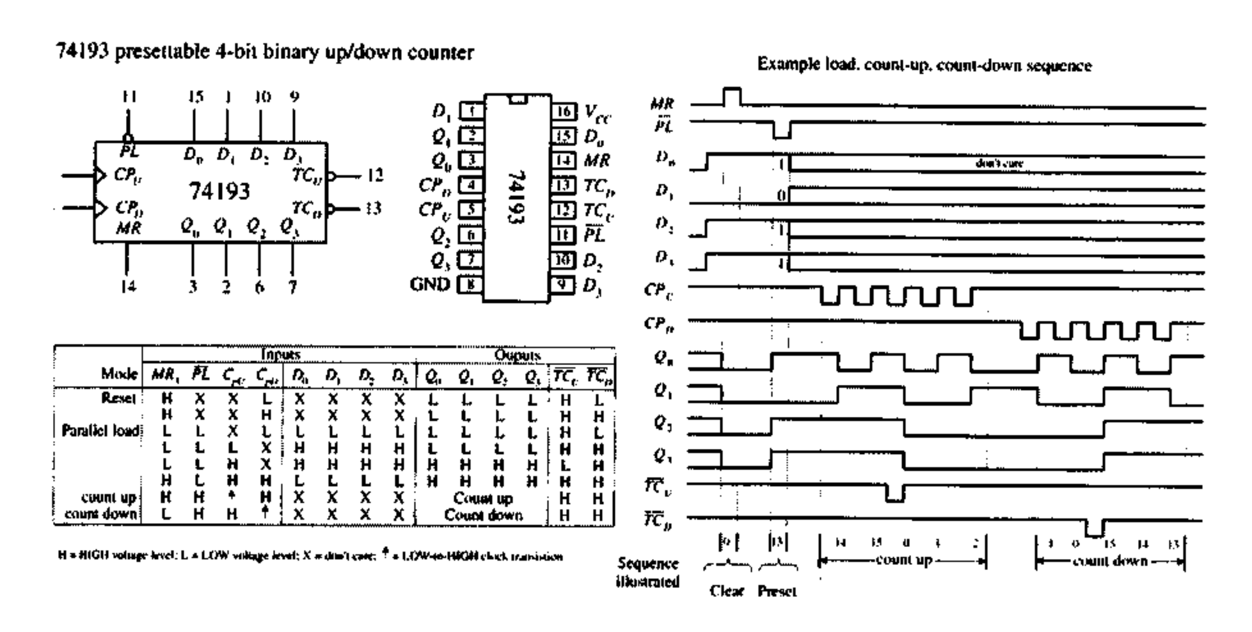
تتوفر دارات متكاملة للعدادات المتزامنة تعمل بقيم MOD مختلفة، ولهذه الدارات ميزات إضافية كالعد التصاعدي UP Counting والعد التنازلي (down counting) ومداخل تحميل متواز لوضع مخارج العداد على قيمة أولية مرغوبة للعد. الدارات المتكاملة للعدادات المتزامنة أكثر شيوعاً واستخداماً من العدادات غير المتزامنة، ليس فقط بسبب الميزات الإضافية، ولكن لأن أزمنة التأخير فيها قليلة، وسنتعرف فيما يلي على بعض أنواع دارات العدادات المتزامنة المتكاملة شائعة الاستخدام.

عداد صاعد/هابط متزامن MOD-16 4 bit قابل للوضع المسبق 74193

العداد 74193 هو عداد متزامن 4-bit شائع الاستخدام يمكن أن يعد بشكل تصاعدي أو تنازلي بين الصفر (0) و(15) ويمكن وضع مخارجه مسبقاً على أية قيمة بين العددين (0) و(15). للعداد مدخلا Clock، C_{PU} وC_{PD}. يستخدم المدخل C_{PU} للعد التصاعدي والمدخل C_{PD} للعد التنازلي ويجب أن يكون أحد هذين المدخلين (high) عند وصل نبضات clock إلى المدخل الآخر. يؤخذ الخرج الثنائي من Q_0 (2^0)، Q_1 (2^1)، Q_2 (2^2) وQ_3 (2^3). لوضع هذه المخارج على قيمة ما يُطبق العدد الثنائي المطلوب على المداخل D_0 حتى D_3 وعندما تطبق نبضة Low على مدخل التحميل المتوازي ($\overline{PL}$) يظهر العدد الثنائي المطبق على المداخل (D_0 - D_3) على الخرج ويبدأ العداد بالعد التصاعدي أو التنازلي بدءاً من هذا العدد. يستخدم الخرج $\overline{TC_U}$ للدلالة على الوصول إلى العدد الأعظمي وأن العداد سيكرر دورة العد بدءاً من العدد الأصغري (0000) وينتقل الخرج ($\overline{TC_U}$) إلى حالة (Low) عندما يصل العد إلى (1111) 15 وعند انتقال نبضة (C_{PU}) من (high) إلى (Low). تبقى $\overline{TC_U}$ Low حتى عودة C_{PU} إلى حالة high. يمكن استخدام نبضة Low على $\overline{TC_U}$ كدخل للمرحلة التالية في عداد متعدد المراحل.

يستخدم خرج طرفية العد التنازلي $\overline{TC_D}$ للدلالة على الوصول أثناء العد إلى العدد الأصغري وهو (0000)، وأن العداد سيكرر دورة العد بدءاً من (1111) 15 وهذا يعني بالضبط أن $\overline{TC_D}$ تنتقل إلى حالة Low عندما يصل العد التنازلي إلى (0000) وتنتقل نبضة Clock (C_{PD}) إلى حالة Low.

يبيِّن الشكل جدول حقيقة للعداد 74193، وشكل الدارة المتكاملة مبيناً عليه وظائف الأرجل إضافة إلى المخططات النبضية لعد تصاعدي وتنازلي.



Mode	MR	$\overline{PL}$	C_{PU}	C_{PD}	D_0	D_1	D_2	D_3	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3	$\overline{TC_U}$	$\overline{TC_D}$
	Inputs								Outputs					
Reset	H	X	X	L	X	X	X	X	L	L	L	L	H	L
	H	X	X	H	X	X	X	X	L	L	L	L	H	H
Parallel load	L	L	X	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	L
	L	L	L	X	H	H	H	H	L	L	L	L	H	H
	L	L	H	X	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H
	H	L	H	H	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H
count up	H	H	↑	H	X	X	X	X	Count up				H	H
count down	L	H	H	↑	X	X	X	X	Count down				H	H

H = HIGH voltage level; L = LOW voltage level; X = don't care; ↑ = LOW-to-HIGH clock transition

الشكل (105.12): العداد المتزامن 74193.

العداد 74192 (BCD أو MOD-10) تصاعدي تنازلي

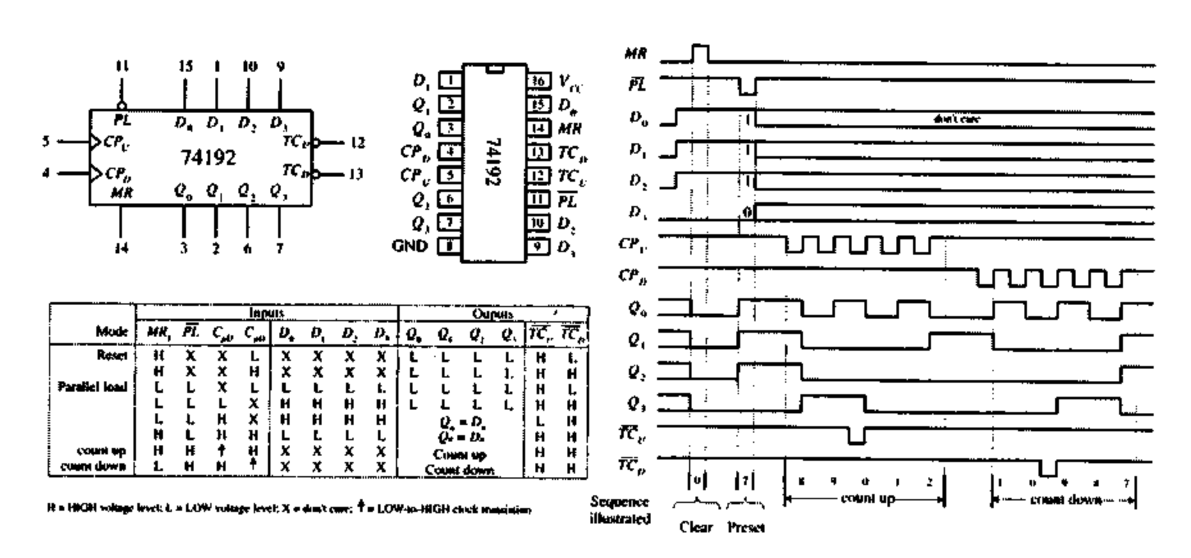
العداد 74193 المبيَّن في الشكل (106.12) يشبه العداد 74193، إلا أنه يعد من (0) حتى (9) ويكرر ذلك، أو يعد من (9) إلى (0) ويكرر وعند العد التصاعدي فإنَّ طرفية خرج العد التصاعدي ($\overline{TC_U}$) تنتقل إلى حالة (Low) للدلالة على وصول العد إلى القيمة العظمى (1001 أو 9) وأن نبضة Clock تنتقل من high إلى Low. تبقى $\overline{TC_U}$ في حالة Low حتى تعود C_{PU} إلى حالة high. عند العد التنازلي تنتقل طرفية خرج العد التنازلي $\overline{TC_D}$ إلى حالة Low عند وصول العد إلى القيمة الدنيا (0000) وعند انتقال C_{PD} إلى حالة Low. يُبيِّن جدول الحقيقة والمخططات النبضيَّة المبينة في الشكل (106.12) آلية عمل هذا العداد.

العداد 74190 والعداد 74191

إن أداء العدادات 74190 و74191 مشابه لأداء العدادات 74192 و74193 ولكن أرجل الدخل والخرج وأنماط العمل مختلفة قليلاً.

يوجد تطابق في أرقام ووظائف الأرجل للعدادين 74190 و74191 والفرق الوحيد بينهما هو القيمة العظمى للعد. يمكن وضع خرج هذه العدادات على قيمة أولية (presettable) باستخدام التحميل التفرعي ($\overline{PL}$).

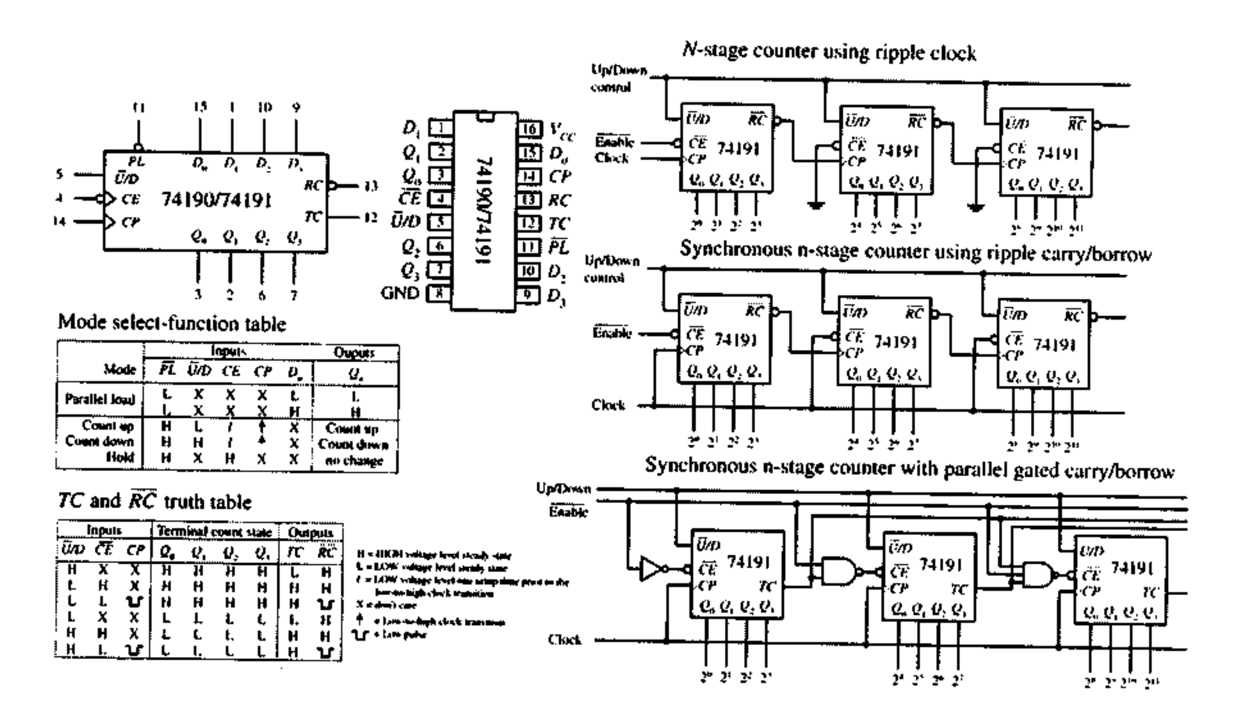
يوجد مدخل واحد للاختيار بين العد التصاعدي أو التنازلي وهذا المدخل هو ($\overline{U}/D$) فعندما يكون المدخل Low يتم العد تصاعدياً، وعندما يكون high يتم العد تنازلياً. يعمل مدخل تمكين Clock $\overline{CE}$ على تفعيل أو إلغاء تفعيل العداد. عندما يكون $\overline{CE}$ في حالة Low يكون العداد مفعلاً، أما عندما يكون $\overline{CE}$ في حالة high يتوقف العداد ويثبت ناتج العد على المخارج Q_0 وحتى Q_3. للعدادات 74190 و74191 طرفية خرج عداد واحدة TC وتدل هذه الطرفية على الوصول إلى القيمة العظمى أو الدنيا للعد. في حالة العد التنازلي تنتقل TC من حالة High الاعتيادية إلى حالة Low عند وصول العد إلى صفر (وذلك في العدادين 74190 و74191). كذلك الأمر في حالة العد التصاعدي إذ تكون TC في حالة Low ولكنها تنتقل إلى حالة high. عند وصول العد إلى 9 (في العداد 74190) وإلى 15 في العداد 74191. يتبع خرج clock التموجي $\overline{RC}$ Clock الدخل CP عندما يكون TC في حالة high، وهذا يعني مثلاً في حالة العد التنازلي وعند وصول العد إلى الصفر، فإن $\overline{RC}$ تنتقل إلى Low عندما تنتقل CP إلى Low. يمكن استخدام الخرج $\overline{RC}$ كمصدر نبضات Clock لدخل المرحلة العليا التالية من عداد متعدد المراحل، وهذا يؤدي إلى اعتبار العداد متعدد المراحل ليس متزامناً فعلاً بسبب تأخير الانتشار القليل بين CP و$\overline{RC}$ لكل عداد. ولجعل العداد متعدد المراحل متزامناً يجب وصل مداخل Clock إلى خط دخل Clock مشترك. يستخدم المخرج TC لمنع كل مرحلة تالية من العد حتى وصول المرحلة السابقة لها إلى القيمة العظمى للعد. يبيّن الشكل (107.12) عدادات متزامنة وشبه متزامنة متعددة المراحل باستخدام الدارة المتكاملة 74191.



Mode	Inputs								Outputs					
	MR	$\overline{PL}$	C_{pU}	C_{pD}	D_0	D_1	D_2	D_3	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3	$\overline{TC}_U$	$\overline{TC}_D$
Reset	H	X	X	L	X	X	X	X	L	L	L	L	H	L
	H	X	X	H	X	X	X	X	L	L	L	L	H	H
Parallel load	L	L	X	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	L
	L	L	L	X	H	H	H	H	L	L	L	L	H	H
	L	L	H	X	H	H	H	H	$Q_n = D_n$				L	H
	H	L	H	H	L	L	L	L	$Q_n = D_n$				H	H
count up	H	H	↑	H	X	X	X	X	Count up				H	H
count down	L	H	H	↑	X	X	X	X	Count down				H	H

H = HIGH voltage level; L = LOW voltage level; X = don't care; ↑ = LOW-to-HIGH clock transition

الشكل (106.12): المخططات النبضية وجدول الحقيقة للعداد 74192.



Mode select-function table

Mode	Inputs					Outputs
	$\overline{PL}$	$\overline{U}/D$	$\overline{CE}$	CP	D_n	Q_n
Parallel load	L	X	X	X	L	L
	L	X	X	X	H	H
Count up	H	L	l	↑	X	Count up
Count down	H	H	l	↑	X	Count down
Hold	H	X	H	X	X	no change

TC and $\overline{RC}$ truth table

Inputs			Terminal count state				Outputs	
$\overline{U}/D$	$\overline{CE}$	CP	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3	TC	$\overline{RC}$
H	X	X	H	H	H	H	L	H
L	H	X	H	H	H	H	H	H
L	L	⊔	H	H	H	H	H	⊔
L	X	X	L	L	L	L	L	H
H	H	X	L	L	L	L	H	H
H	L	⊔	L	L	L	L	H	⊔

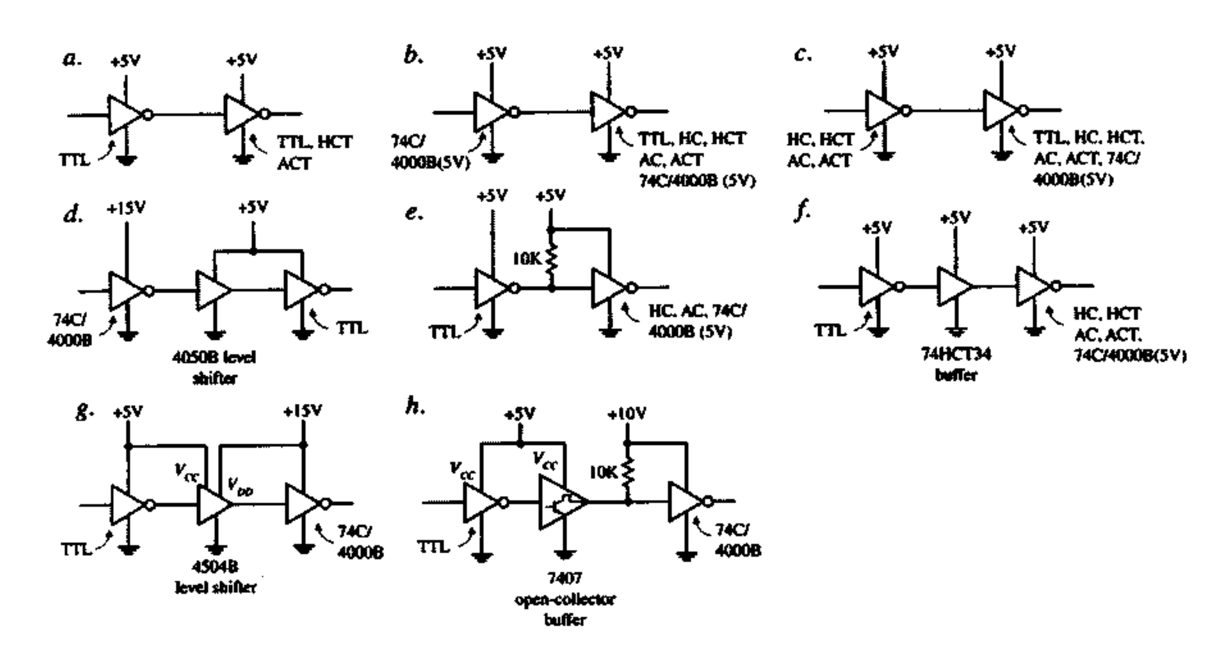
الشكل (107.12): دارات عدادات متعددة المراحل باستخدام الدارة 74191.

العداد 74163 المتزامن صاعد/هابط 4-bit وMOD-16

إنَّ العدادات 74160 و74163 تشبه العدادات 74190 و74191 ولكنها لا تحتاج إلى بوابات خارجيَّة عند استخدامها لتكوين عداد متعدد المراحل وتوصل هذه الدارات المتكاملة مع بعضها كما في الشكل الأخير من (108.12). يمكن أن يبدأ العد اعتباراً من عدد معيَّن يحدد مسبقاً ويتم إدخاله من المداخل D0 حتى D3 ويُحمَّل العدد بتمكين المدخل ($\overline{PE}$) ويظهر هذا العدد على المخارج مع الانتقال التالي لنبضة Clock من Low إلى high.

مدخل التصفير $\overline{MR}$ الفعال في حالة Low يصفر كافة المخارج بغض النظر عن إشارات المداخل. يجب أن تكون مداخل تمكين Clock (CEP) و(CET) في حالة high كي يبدأ العد. ينتقل الخرج (TC) إلى حالة high عند الوصول إلى القيمة العظمى للعد ولكنه يجبر على العودة إلى حالة Low إذا انتقلت CET إلى حالة Low، وهذه ميزة هامة جداً والتي تجعل التوصيلات متعددة المراحل متزامنة وتجنبك الحاجة لاستخدام بوابات خارجية. يبيِّن الشكل (108.12) الدارات المتكاملة 74163 و74160 ووظائف وأرقام أرجلها إضافة إلى جداول الحقيقة للعدادات والمخططات النبضية التي تشرح العمل كعداد صاعد وآخر هابط، كما تعطى في الشكل دارة عداد مكون من ثلاث مراحل باستخدام الدارة المتكاملة 74163 ومن هذا الشكل تلاحظ عدم وجد بوابات خارجيَّة.

كالحواكم أو أضواء البيان وذلك لأن مخارج بوابات CMOS لا تؤمن بطبيعتها التيارات اللازمة لقيادة الأحمال. سوف نناقش قيادة الأحمال في الفقرة (10.12). يبيِّن الشكل (66.12) طرق وصل عوائل مختلفة مع بعضها، وهذه الطرق تأخذ بالاعتبار مشاكل عدم التآلف في الدخل والخرج وكذلك الاختلاف في جهود التغذية، ولكن هذه الطرق لا تأخذ بالاعتبار الفروقات في أزمنة الانتشار (أزمنة التأخير) والمشاكل التي يمكن أن تنشأ عن ذلك.



الشكل (66.12): ربط العوائل المنطقية مع بعضها.

الشكل a: توصل بوابات TTL مباشرة مع بعضها أو مع بوابات من HCT أو ACT.

الشكل b: يمكن لبوابات CMOS نوع 4000B أو 74C التي تغذى من (V_{DD} = +5 V) أن تقود TTL، HC، HCT، AC أو ACT.

الشكل c: HC وHCT، AC وACT تستطيع وبشكل مباشر قيادة TTL، HC، HCT، AC، ACT و74C/4000B المغذاة من (+5 V).

الشكل d: عندما تستخدم 74C/4000B جهد تغذية أعلى من (+5 V)، يمكن استخدام دارة عازل مزيح مستوى، كالدارة 4050B، تُغذى الدارة 4050B من (5 V) ويمكن أن تقبل (0-V/15-V) كمستويات منطقية على مداخلها، وتعطي مستويات منطقية (0-V/5-V) في الخرج، ويؤمن هذا العازل تيار قيادة كبيراً في الخرج (إمكانيات 4000B في قيادة الأحمال في الخرج أقل من إمكانيات TTL).

الشكل e: تذكر أن مستوى high الفعلي لبوابات TTL هو حوالي (3.4 V) وليس تماماً (5 V)، ولكن بوابات CMOS التي تُغذى من +5 V تتطلب أن يكون مستوى الدخل 4.4 V (في HC) و(4.9 V) في 4000B كي تعتبر الدخل high.

إذا كانت دارة CMOS من الأنواع 74C/4000B فإن جهد الدخل العالي المطلوب يتعلق بجهد التغذية ويساوي $\left(\frac{2}{3}V_{DD}\right)$. ومن أجل تأمين جهد كافٍ لملاءمة مستويات الجهد تستخدم مقاومة شد وتعمل مقاومة الشد على رفع دخل بوابة CMOS إلى قيمة تساوي جهدَ التغذية الذي توصل إليه مقاومة الشد.

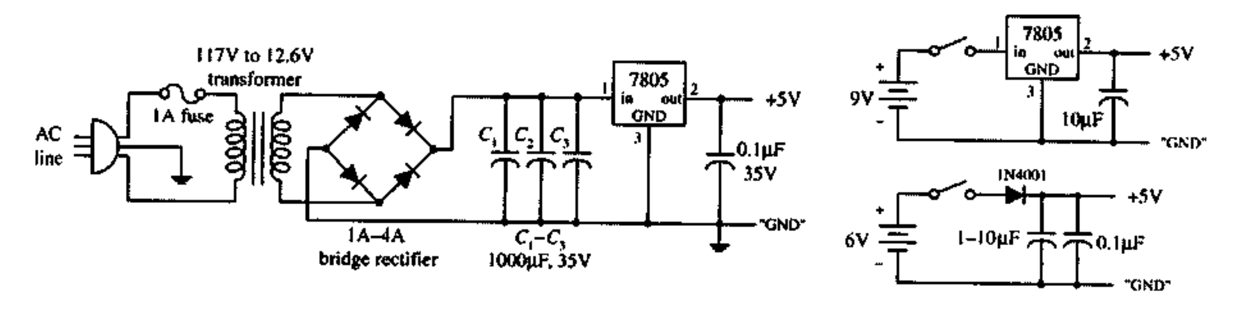
الشكل f: طريقة أخرى لوصل TTL مع CMOS باستخدام بوابة تآلف TTL-CMOS مثل 74HCT أو 74ACT.

الأشكال g وh: تبيّن هذه الأشكال طرقاً مختلفة لوصل بوابات TTL مع بوابات CMOS تُغذى من جهود أعلى. يستخدم فيَ الشكل (g) عازل مزيح مستوى 4504B ويحتاج الـ 4504B جهدي تغذية، تغذية لمستويات TTL المنطقية (0/5 V) وتغذية لمستويات CMOS المنطقية (0-15 V)، أما في الشكل (h) فيُستخدم عازل ذو خرج مفتوح مع مقاومة شد (10 kΩ) لتحويل مستويات جهود خرج TTL إلى مستويات أعلى مناسبة لمداخل بوابات CMOS.

5.12 تغذية واختبار الدارات المتكاملة المنطقيّة وبعض القواعد التجريبيّة

1.5.12 تغذية الدارات المتكاملة المنطقيّة

تُغذى أغلب الدارات التكاملية الرقمية من عوائل TTL وCMOS من جهد تغذية (5 V ± 0.25 V) أي من (5 V ± 5 %) ويمكن تأمين جهد التغذية هذا من الدارة المبينة في الشكل (67.12). يُفضل عدم استخدام البطاريات لتغذية بعض العوائل الفرعية من TTL مثل 74xx، 74S، 74AS و74F والتي تبدد طاقة أعلى من سلاسل CMOS 74HC، وبالطبع يمكن استخدام البطاريات لتغذية العوائل الفرعية منخفضة الجهد وذات الاستهلاك القليل للطاقة مثل 74LV، 74LVC، 74LVT، 74ALVC و74BCT التي تغذى من جهود تتراوح بين (1.2) و(3.6 V) والتي تستهلك حوالي 2.5 µW للبوابة الواحدة (كما هي الحال في 74BCT).



الشكل (67.12): دارة تغذية

2.5.12 حجب مصدرالتغذية

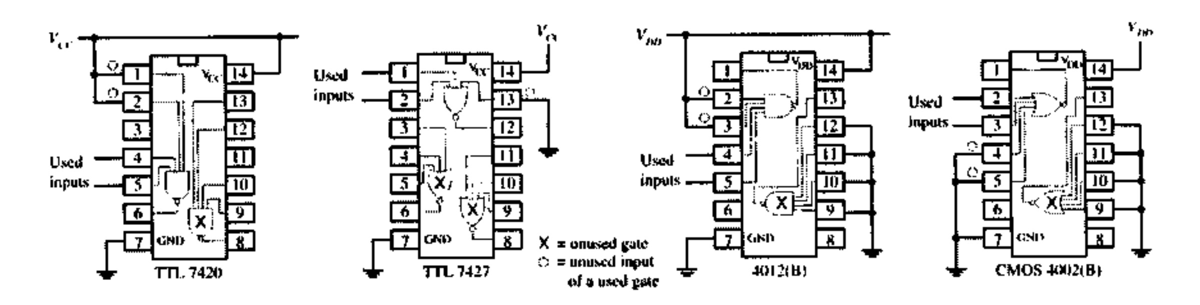
عند حدوث انتقال من High إلى Low أو من Low إلى High في خرج بوابة من عائلة TTL، يكون ترانزستورا الخرج الطوطمي في حالة نقل (conduction) معاً خلال فترة زمنية محدَّدة، وخلال هذه الفترة يحدث تغير شديد في التيار المستهلك من مصدر التغذية وينتج عن ذلك قفزة تيارية حادة عالية التردد في خط التغذية. إذا كان هناك عدد من الدارات المتكاملة التي تغذي من نفس المصدر، فإن هذه القفزة قد تؤدي إلى قدح خاطئ لهذه الدارات. كما أن القفزة تولد إشعاعاً كهرومغناطيسياً غيرم مرغوب. تستخدم مكثفات حجب (decoupling capacitors) لتجنب حدوث القفزات التيارية غير المرغوبة في نظم TTL، ومكثف الحجب هو مكثف من التنتاليوم بسعة تتراوح بين (0.01) و1 µF (جهد أكبر من 5 فولت) ويوصل مباشرة بين رجل التغذية والأرض لكل دارة متكاملة ويمتص المكثف القفزات التيارية ويحافظ على مستوى ثابت لجهد التغذية ويقلل احتمال حدوث القدح الخاطئ والإشعاع الكهرومغناطيسي غير المرغوب. يثبت مكثف الحجب أقرب ما يمكن إلى الدارة المتكاملة لإبقاء قفزات التيار محلية (Local) بدلاً من السماح لها بالانتقال العكسي إلى مصدر التغذية، يمكن تقليل تأثير القفزات التيارية كثيراً باستخدام مكثف واحد لكل (5) إلى (10) بوابات أو مكثف واحد لكل (5) عدادات أو مسجلات.

3.5.12 المداخل غير المستخدمة

إن المداخل غير المستخدمة التي تؤثر على الحالات المنطقية للدارة المتكاملة يجب أن لا تترك عائمة (float)، وبدلاً من ذلك يجب وصلها إلى مستويات high أو Low، حسب الضرورة، وذلك لأن المداخل العائمة معرضة لالتقاط ضجيج كهربائي وقد يؤدي ذلك إلى التأثير على الخرج ونقله إلى حالات خاطئة، فمثلاً إذا كانت لديك بوابة NAND من عائلة TTL بأربعة مداخل وأردت فقط استخدام مدخلان منها، فإن المدخلين الباقيين يوصلان إلى مستوى (high) للحفاظ على سلامة عمل البوابة، أما في بوابة NOR ثلاثية المدخل والتي يستخدم فيها مدخلين فقط، فإن المدخل الثالث يوصل إلى مستوى Low وكذلك الأمر بالنسبة لمداخل التصفير (Clear) والوضع القسري (PRESET) في القلابات (Flip-Flops) حيث يجب وصل هذه المداخل مع high أو مع الأرضي عند عدم استخدامها، وذلك حسب الحالة التي تضمن العمل الصحيح للدارة المتكاملة.

إذا تعاملت مع دارات متكاملة كدارات البوابات واستخدمت بعض البوابات و لم تستخدمها كلها ضمن دارة متكاملة واحدة فإن مداخل البوابات غير المستخدمة يمكن تركها عائمة في عائلة TTL أما في CMOS فلا يسمح بتركها عائمة. في دارات CMOS وعند ترك مداخل البوابات غير المستخدمة عائمة تلتقط هذه البوابات شحنات قد تصل إلى مستويات جهدية تجعل كافة ترانزستورات الخرج في حالة نقل في آن واحد ويؤدي ذلك إلى قفزة تيارية كبيرة بين مصدر التغذية V_{DD} والأرض، وقد يؤدي ذلك إلى استهلاك عالٍ للتيار وقد ينتج عنه تخريب الدارة، ولتلافي هذا الخطر يجب تأريض مداخل البوابات غير المستخدمة في عائلة CMOS.

يبيّن الشكل (68.12) ما الذي يجب فعله بالمداخل غير المستخدمة في عوائل CMOS وTTL وذلك فقط لبوابات NAND وNOR. وكملاحظة هامة ننبه إلى ضرورة عدم تطبيق إشارات قيادة على مداخل بوابات CMOS إذا كانت الدارة غير مغذاة لأن ذلك يمكن أن يُخرِّب ديودات حماية المداخل.

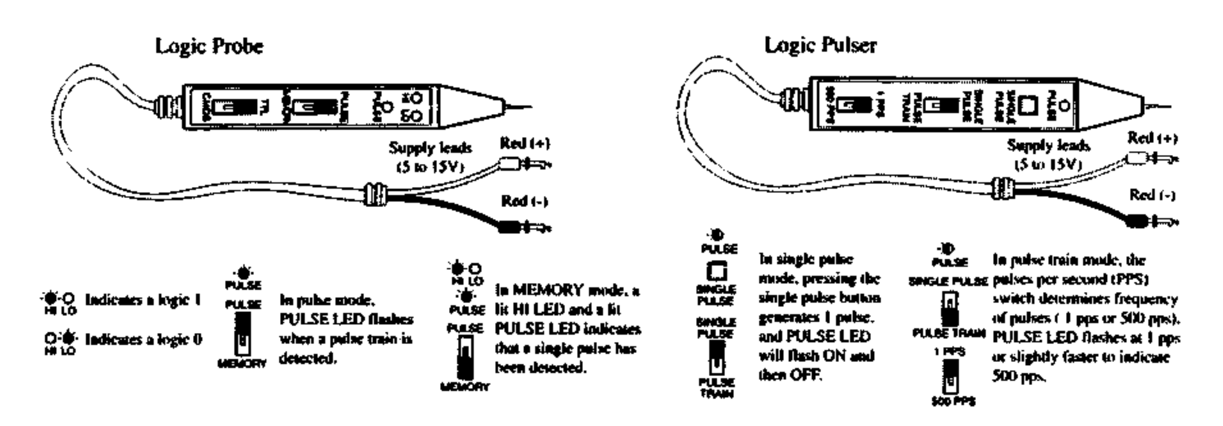


الشكل (68.12): التعامل مع المداخل غير المستخدمة في عوائل TTL وCMOS.

توصل المداخل غير المستخدمة لبوابات NAND إلى High والمداخل غير المستخدمة لبوابات NOR إلى الأرض أما مداخل البوابات غير المستخدمة في TTL فيمكن تركها عائمة. نفس الشيء ينطبق على بوابات CMOS ماعدا مداخل البوابات غير المستخدمة والتي يجب تأريضها حتماً.

4.5.12 المجسات المنطقية ومولد نبضات منطقية

تستخدم وسيلتان بسيطتان لاختبار الدارات والدارات المتكاملة المنطقيّة، وهاتان الوسيلتان هما مجس الاختبار (test probe) ومولد النبضات المنطقي (Logic Pulser) كما في الشكل (69.12).



الشكل (69.12): المجس المنطقي ومولد النبضات.

يتوفر المجس المنطقي بشكلٍ يشبه القلم وله رأس اختبار معدني وتخرج منه أسلاك التغذية، فالسلك الأحمر يوصل إلى موجب مصدر التغذية والسلك الأسود يوصل إلى سالب التغذية، ولاختبار الحالة المنطقية لنقطة في الدارة يوضع الرأس المعدني للمجس عليها فإذا كانت حالتها المنطقية (High) فإن الديود المصدر للضوء LED الذي يدل على الحالة المنطقية يُضيء، أما إذا كانت الحالة المنطقية للنقطة Low فإن الديود الخاص بحالة Low على المجس يُضيء دلالة على ذلك. يمكن إنجاز بعض الاختبارات الديناميكية بواسطة المجس المنطقي (إضافة إلى الاختبارات الساكنة) مثل اكتشاف نبضة لحظية وحيدة سريعة جداً ولا يمكن اكتشافها بالعين البشرية، أو اكتشاف قطار نبضات (pulse train) كنبضات clock. يوضع مفتاح PULSE/MEMORY على وضع MEMORY عند الرغبة في كشف نبضة وحيدة، وعند كشف النبضة الوحيدة، فإن دارة الذاكرة الداخلية تتذكر النبضة الوحيدة وتضاء ديودات LEDS حالة (HI) وحالة (PULSE) مع بعض في نفس الوقت، ولمسح الذاكرة من أجل كشف نبضة أخرى يُعاد مفتاح PULSE/MEMORY إلى حالة PULSE ثم إلى حالة MEMORY. يوضع مفتاح PULSE/MEMORY على حالة PULSE من أجل اكتشاف قطار نبضات، وعند اكتشاف قطار نبضات فإن ديود النبضات (PULSE LED) يُضيء بشكل متقطع. يستطيع المجس المنطقي اكتشاف نبضات وحيدة بعرض حتى 10 ns كما يكتشف قطار نبضات بتردد 100 MHz وعند شراء مجس منطقي عليك قراءة مواصفات المجس ومعطياته لمعرفة إمكانياته وحدود استخدامه الأعظمية والأصغرية.

يمكنك مولد النبضات المنطقي (Logic Pulser) من إرسال نبضة واحدة أو قطار نبضات عبر دارة متكاملة أو دارة منطقيَّة، ويمكن مراقبة نتائج إرسال هذه النبضات عبر الدارة بواسطة مجس منطقي. يحتاج المولد المنطقي إلى تغذية بالجهد المستمر لذلك يزود بأسلاك لتوصيل التغذية. يوجد على المولد مفتاح SINGLE PULSE/PULSE TRAIN ويوضع هذا المفتاح على حالة SINGLE PULSE ويُضغط مفتاح SINGLE PULSE.

أما عند الرغبة في إرسال قطار نبضات فإن المفتاح يوضع على حالة PULSE TRAIN. في المولد النبضي المبيَّن في الشكل (69.12) يمكن الاختيار بين نبضة في الثانية (1 pps) أو 500 نبضة في الثانية.

6.12 المنطق التتابعي

إن الدارات التركيبيَّة التي تمت تغطيتها سابقاً (كالمرمزات، والكواشف، والموزعات، ومولدات التكافؤ.. وغيرها) لها خاصية الاستجابة اللحظيَّة وهذا يعني أنه عند تطبيق معطيات على الدخل فإن الخرج يستجيب آنيّاً (أو لحظياً)؛ ولذلك نعتبر أن الدارات التركيبيَّة تفتقد لميزة هامة وهي عدم قدرتها على تخزين المعلومات. ولتزويد دارة ما بإمكانية التذكر يجب أن يُضاف إليها ماسك (Latch) يمسك المعطيات في لحظة معينة من الزمن. يُسمى مجال الإلكترونيات الرقميَّة الذي يهتم بهذا الموضوع باسم المنطق التتابعي (Sequential Logic)، ويعود سبب التسمية التتابعية (Sequential) بسبب خانات

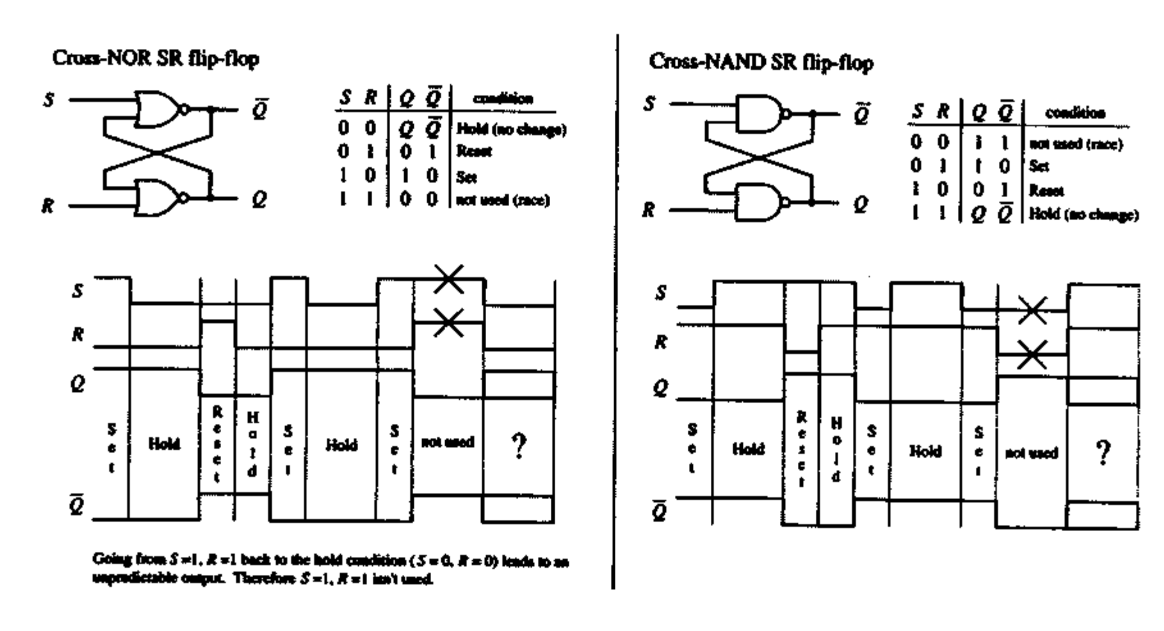
المعطيات التي يجب أن تُخزَّن وتستعاد، حيث يجب أن تحدث سلسلة من الخطوات بترتيب محدَّد. على سبيل المثال يمكن أن تكون سلسلة الخطوات هي إرسال نبضة تمكين إلى أداة (عنصر) التخزين ثم تحميل مجموعة من خانات المعطيات كلها دفعة واحدة (تحميل تفرعي) أو تحميل المعطيات خانة فخانة (بشكل تسلسلي).

عند استعادة المعطيات تطبق أولاً سلسلة من النبضات على عنصر التخزين، وربما تكون هناك حاجة لسلسلة من النبضات الأخرى كي تتم استعادة الخانات المخزونة من الذاكرة.

هناك حاجة لمولد نبضات clock عند الرغبة في دفع (push) النبضات عبر دارة تتابعيَّة، ومولد نبضات clock يشبه من حيث الوظيفة قلب الإنسان فهو يولد سلسلة من نبضات high وLow الجهديَّة (وهذه السلسلة من النبضات الجهدية (تشبه سلسلة نبضات الضغط التي يولدها القلب عند ضخه للدم عبر الجسم). يعمل مولد نبضات clock (التي تسمى أيضاً نبضات الساعة) كقاعدة زمنية (time base) تعتبر مرجعاً لكل العمليات التتابعيَّة. سوف ندرس مولدات clock بالتفصيل فيما بعد، أما الآن فسندرس العنصر الأساسي في العناصر التتابعيَّة وهو القلاب RS.

1.6.12 القلابات SR

إنَّ أبسط دارة تخزين معطيات هي القلاب SR (قلاب الوضع ـــ والإرجاع set-reset) ويسمى هذا القلاب أيضاً ماسكاً شفافاً (Transparent Latch)، ويوجد نوعان أساسيان منه هما قلاب NOR وقلاب AND.



الشكل (70.12): قلابات NOR SR وAND SR.

نبدأ أولاً بدراسة قلاب NOR SR، ونلاحظ من الشكل أن لهذا القلاب مدخلين فقط هما (S) و(R) وذلك لأن المدخل السفلي لبوابة NOR العلوية موصول مع خرج بوابة NOR السفلية والمدخل العلوي لبوابة NOR السفلية موصول مع خرج NOR العلوية. نفرض مؤقتاً أن المخارج Q و $\overline{Q}$ ليست متعاكسة منطقياً ونرمز لها بـــ (X) و(Y).

من المعلوم أن بوابة NOR تعطي في خرجها (1) إذا كان مدخلاها في حالة (0)، ومن ذلك تلاحظ أنه إذا كان S = 1 وR = 0 فإن Q = 1 و $\overline{Q} = 0$ وذلك بغض النظر عن حالة المخارج السابقة، وتسمى هذه الحالة حالة وضع (Set)، وبنفس الطريقة تلاحظ أنه عندما يكون R = 1 وS = 0 فإن Q = 0 و $\overline{Q} = 1$ وتسمى هذه الحالة حالة الإرجاع (reset).

إذا كان R = 0 وS = 0 فهل تستطيع التنبؤ بوضع الخرج دون معرفة حالة الخرج السابق؟ بالطبع لا لأن وضع المخارج

في هذه الحالة يتعلق بالوضع السابق للمخارج، ولكن إذا عرفت الوضع السابق للمخارج فإنك تستطيع معرفة الخرج اللاحق أي عند تطبيق $R = 0$ ،$S = 0$. إذا كانت مخارج القلاب $Q = 1$ و $\overline{Q} = 0$ ثم وضعت $S = 0$ و $R = 0$، فإن القلاب يبقى في حالة وضع (في البوابة العلوية لديك $S = 1$، $Q = 1$، $\overline{Q} = 0$، وفي البوابة السفلية $R = 0$، $\overline{Q} = 0$، $Q = 1$). وبنفس الطريقة إذا انطلقت من حالة (إرجاع $Q = 0$، $\overline{Q} = 1$ ثم طبقت $R = 0$ و $S = 0$ فإن القلاب يبقى في حالة إرجاع (البوابة العلوية $\overline{Q} = 1$، $Q = 0$ و $S = 0$؛ البوابة السفلية $R = 0$، $\overline{Q} = 1$ و $Q = 0$). وهذا يعني أن القلاب يُحافظ على الحالة السابقة (يمسك الحالة السابقة عندما يكون مدخلاه في حالة (0) وتسمى هذه الحالة حالة المسك (hold).

عندما يكون $S = 1$، $R = 1$ فإن المخارج ستكون $Q = 0$ و $\overline{Q} = 0$ لأن بوابة NOR تعطي (0) في الخرج إذا كان أحد مدخليها (1) وهنا توجد مشكلتان والسؤال الأول الذي يتبادر إلى الذهن حول هاتين المشكلتين هو لماذا نريد وضع وإرجاع القلاب في آن واحد؟ والسؤال الثاني هو عند العودة إلى حالة المسك من حالة $S = 1$ و $R = 1$ هل يمكن التنبؤ بوضع المخارج؟ وبالنسبة للتساؤل الثاني من الواضح أنه لا يمكن التنبؤ بالنتيجة إلا إذا عرفنا أي المداخل يعود متأخراً إلى حالة (0)، لماذا؟ عند العودة بالمداخل إلى حالة المسك hold ($R = 0; S = 0, Q = 0, \overline{Q} = 0$)، فإن كلا المخرجين يحاول البقاء في حالة (1)، ولكن لنفرض أن خرج إحدى بوابات NOR قد انتقل إلى (1) متقدماً على المخرج الآخر بجزء من الثانية عندها لن يُعطي الخرج المتأخر (1) ولكن سيعطي (0) وهذا مثال تقليدي عن حالة سبق.

ولكن أي الخرجين أسرع؟ لا يمكن معرفة الجواب بدقة وهذه الحالة لا يمكن التنبؤ بها ولذلك فإنها وبكل بساطة حالة لا تستخدم نهائياً.

يؤدي قلاب AND SR نفس وظيفة القلاب السابق مع وجود فارق أساسي، وهو أن حالات hold (المسك) والحالة غير المحدَّدة معاكسة للقلاب السابق وسبب ذلك أن بوابة AND تعطي في خرجها (1) فقط عندما يكون دخلاها (1) ولذلك تكون حالة المسك هي ($S = 1, R = 1$)، أما الحالة غير المحددة فهي حالة ($S = 0, R = 0$)، وفيما يلي نتعرف على تطبيقين بسيطين للقلابات SR.

مانع ارتداد مفتاح

لتكن لديك الدارة اليساريّة المبينة في الشكل (71-12) والمكونة من بوابة AND بمدخلين أحدهما موصول دوماً إلى (1)، أما المدخل الثاني فهو موصول عبر مقاومة إلى V 5+ وعبر مفتاح (Switch) إلى الأرض عندما يكون المفتاح غير مغلق (Open) يُطبق (1) على المدخل وعندما يكون موصولاً (closed) يُطبق (0) على المدخل. هذا ما يجب أن يحدث فعلاً، إلا أن الذي يحدث فعلياً في الدارة هو أن المفتاح يرتد (bounce) عند وصله عدة مرات قبل أن يصل إلى حالة الاستقرار والإغلاق وذلك بسبب الخاصية شبه النابضية للتماسات. ومع أن الارتداد لا يستمر أكثر من 50 ms، إلا أن ذلك قد يؤدي إلى قدح خاطئ كما يتضح من أشكال الخرج والدخل المبينة بالقرب من البوابة ويمكن التخلص من هذه المشكلة ببساطة باستخدام دارة مانع ارتداد للمفتاح والدارة مبينة في وسط الشكل (71.12) وفي هذه الدارة يستخدم قلاب RS لمسك الحالة الأولية لجهد تماس المفتاح وهمل بذلك كل الارتدادات.

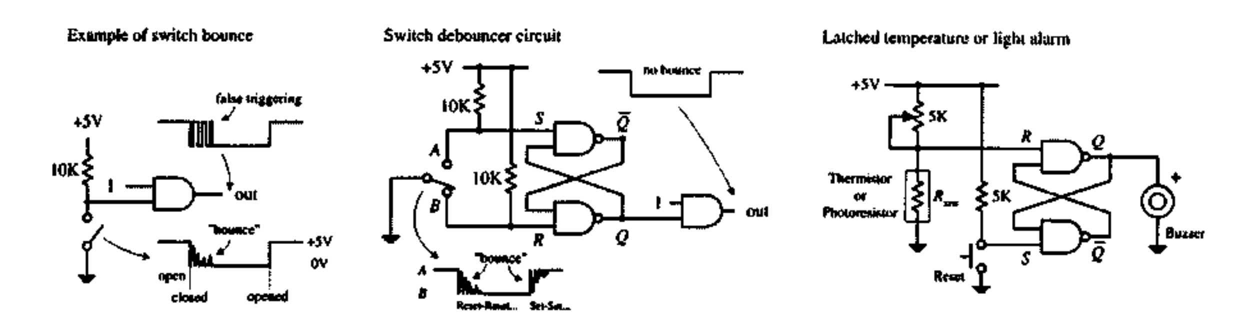
عند انتقال المفتاح من الوضع (B) إلى (A) ينتقل القلاب إلى حالة SET (وضع)، وعند ارتداد المفتاح عدة مرات يبقى الخرج $Q = 1$ وذلك لأن الدخل S يُطبق عليه (0) عند ارتداد المفتاح وبما أن ($R = 0$) أيضاً ويكون القلاب في حالة مسك للحالة السابقة في الخرج. يحدث منع الارتداد أيضاً عند انتقال المفتاح من A إلى B.

إنذار حراري أو ضوئي ممسوك

تستخدم الدارة اليمينية في الشكل (71.12) قلاب SR لإطلاق إنذار من رنان عندما تصل درجة الحرارة (بفرض استخدام مقاومة حرارية) أو شدة الإضاءة (عند استخدام مقاومة ضوئية) إلى مستوى حدي. عند زيادة الحرارة/الإضاءة فإن المقاومة الحساسة للحرارة/للضوء تنخفض وينخفض جهد المدخل (R) وعندما يصل جهد المدخل R إلى ما دون جهد

العتبة للمستوى high فإن R تعتبر (0) وينتقل القلاب إلى حالة (Set) وينطلق الإنذار الصوتي ويستمر الإنذار حتى يُضغط مفتاح RESET وتكون درجة الحرارة أو شدة الإضاءة قد انخفضت إلى ما دون المستوى الحدي.

تُستخدم المقاومة المتغيرة (مقسم الجهد Pot) لضبط المستوى الحدي.



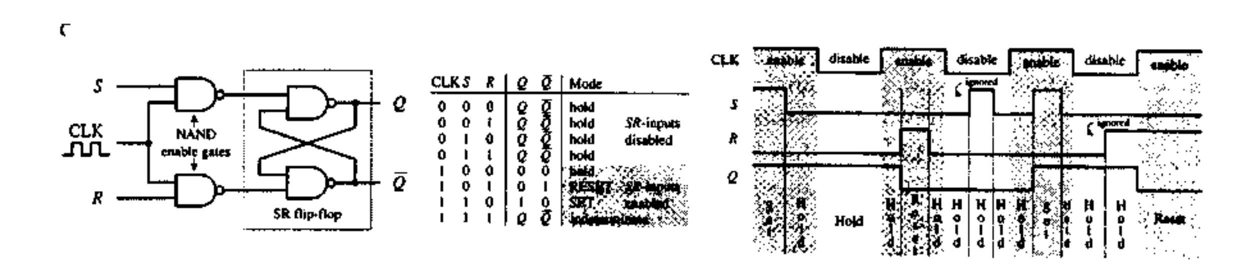
الشكل (71.12): دارات مانع ارتداد وإنذار حراري أو ضوئي ممسوك.

قلاب SR يُقدم عند مستوى معيَّن

من المفيد في التطبيقات أن نجعل القلاب SR متزامناً، ومعنى ذلك أن المداخل R وS يجب أن تُفعَّل أو لا تفعل بواسطة نبضة تحكم، مثل نبضات Clock، وبذلك تصبح المداخل R وS فعالة فقط عند تطبيق نبضات Clock، تسمى قلابات SR التي تستجيب وفقاً لهذه الطريقة باسم القلابات المتزامنة أو القلابات المزامنة (Clocked Flip Flops)، وذلك تمييزاً لها عن القلابات السابقة غير المتزامنة.

توصل بوابات تفعيل إلى مداخل القلاب السابق لجعله متزامناً كما في الشكل (72.12) وقد استخدمت في الشكل بوابات NAND كبوابات تفعيل، ويمكن أيضاً استخدام بوابات NOR. تكون المداخل S وR مفعلة فقط عندما تكون نبضة Clock في حالة (High) وعندما تكون نبضة Clock في حالة Low تكون المداخل غير مفعلة ويعمل القلاب في نمط المسك hold.

إن مخطط التوقيت (timing diagram) وجدول الحقيقة المبينان في الشكل يوضحان آلية عمل هذا القلاب.



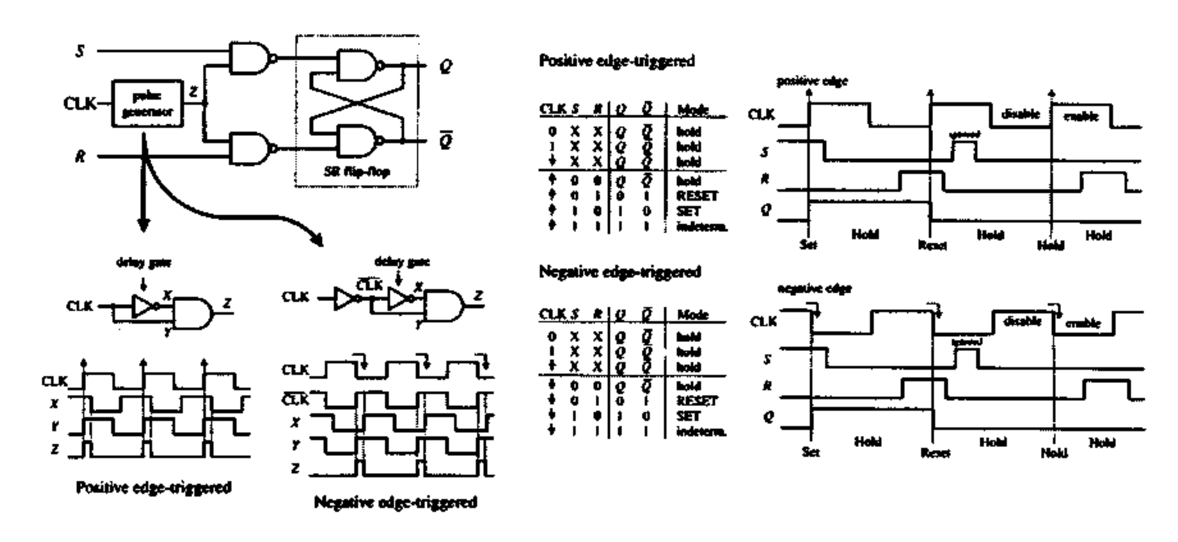
الشكل (72.12): قلاب SR متزامن.

قلابات SR التي تقدم على الجبهة (حافة النبضة)

توجد خاصية مزعجة في القلاب المتزامن السابق، وهي ضرورة بقاء S وR على نفس حالاتها المنطقية (Set، Reset، No Change) طيلة الفترة التي تفعل فيها نبضة Clock القلاب.

يمكن جعل القلاب السابق أكثر مرونة بتغيير بسيط وذلك بتحويله إلى قلاب يُقدح على جبهة نبضات Clock والقلاب الذي يُقدح على الجبهة هو قلاب تُفعل فيه المداخل SR فقط على الجبهة الموجبة أو السالبة لنبضات Clock، ويرمز للجبهة

الموجبة بالسهم (↑) وللجبهة السالبة بالسهم (↓) وتهمل كل التغيرات التي تحدث قبل أو بعد جبهة القدح، لأن القلاب يكون في حالة hold ولتحويل القلاب المتزامن (الذي يُقدح عند مستوى Level Triggered) إلى قلاب يُقدح على الجبهة، يُوصل مع القلاب مولد نبضات Clock يؤمن قدحاً على إحدى الجبهات الموجبة أو السالبة، كما في الشكل (73.12). تُضاف بوابة NOT ذات تأخير انتشار (propagation delay) إلى دارة القدح على الجبهة الموجبة، وبما أن نبضات Clock تؤخر عند مرورها في العاكس فإن بوابة AND لن تعطي Low (كما هي الحال عند عدم استخدام بوابة العاكس) بل ستعطي نبضة تبدأ مع الجبهة الصاعدة (الموجبة) لنبضة Clock وتستمر لفترة زمنية تساوي تأخير الانتشار في بوابة NOT وتستخدم هذه النبضة لمزامنة القلاب. في دارات القدح على الجبهة السالبة تعكس نبضات Clock أولاً ثم تطبق على دارة NOT/AND وتبدأ نبضة الخرج مع الجبهة الهابطة لنبضة Clock وتستمر لفترة تساوي أيضاً تأخير الانتشار في بوابة NOT. يكون زمن التأخير عادة صغيرا (من مرتبة النانو ثانية nanoseconds) بحيث تكون نبضة المزامنة ضيقة.



الشكل (73.12): دارات قدح على الجبهات ومخططاتها النبضيّة.

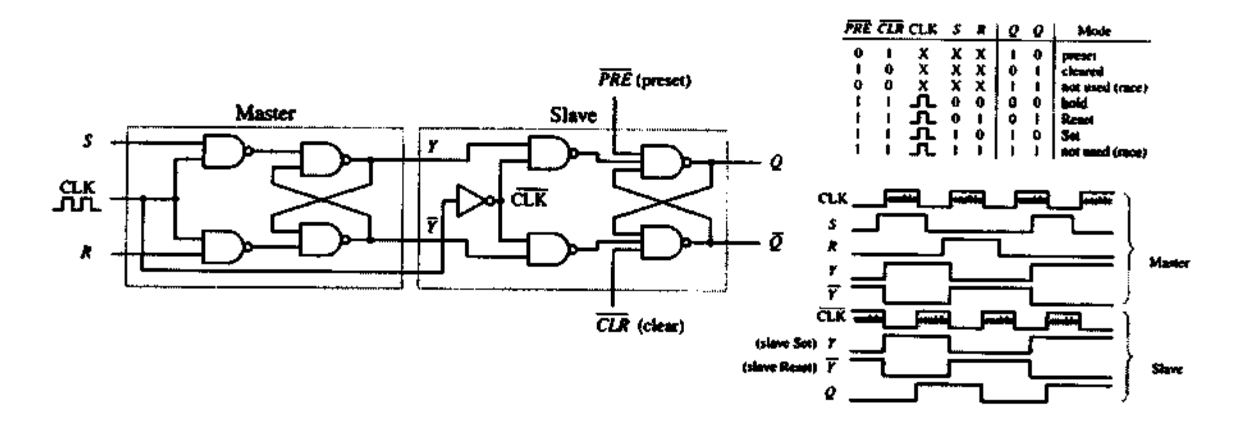
قلاب SR يُقدح نبضيا (قلاب السيد والعبد)

القلاب SR المقدوح نبضياً هو قلاب يقدح بالمستوى (level triggered) ولكن لكي يحدث التغيُّر في الخرج يجب أن ترتفع وتنخفض مستويات (Low) و(High)، وتسمى هذه القلابات باسم قلابات السيد والعبد.

يتقبل السيد (Master) المداخل الأولية ويُطبق هذه المداخل على العبد (Slave) مع الجبهة الهابطة لنبضة Clock ويمكن تشبيه هذا العمل بآلية عمل البندقية حيث توضع فيها الطلقة أولاً ثم تلقم (وضع الطلقة في البندقية يشبه تطبيق إشارات المداخل على السيد) والتلقيم يشبه قدح السيد على الجبهة الصاعدة لنبضة Clock وبعد التلقيم تطلق البندقية وعملية الإطلاق تشبه تطبيق حالات المداخل الأولية من خرج السيد على مداخل العبد مع الجبهة الهابطة لنبضة Clock. يبيِّن الشكل (74.12) قلاب SR من نوع السيد والعبد.

يمكن اعتبار السيد بأنه قلاب SR يمكَّن خلال فترة high من نبضة clock ويعطي مخارج Y و $\overline{Y}$ (إما set، أو Reset، أو لا تغيُّر no change). أما العبد فهو مشابه للسيد ولكنه يُقدح فقط على الجبهة الهابطة لنبضة clock بسبب وجود العاكس، وفي اللحظة التي يمكَّن فيها العبد فإنه يستخدم مخارج السيد Y و $\overline{Y}$ ويُعطي الخرج النهائي. لاحظ وجود مداخل ($\overline{PRE}$) (الوضع القسري) والتصفير ($\overline{CLR}$). تسمى هذه المداخل باسم المداخل غير المتزامنة (asynchronous inputs). وبعكس المداخل المتزامنة (S) و(R) فإن المداخل غير المتزامنة تتجاهل نبضات Clock وإما أن تصفر الخرج (Clear) أو تجبر الخرج على حالة وضع قسري (Preset). عندما تكون $\overline{CLR} = 1$ أو High و $\overline{PRE} = 0$ أو Low — (0 = Low، 1 = High) —

فإن الخرج يكون Q = 1 و Q̄ = 0 وذلك بغض النظر عن حالات المداخل S وR وعن نبضات Clock وتسمى هذه الحالة حالة وضع قسري (Preset). توصل المداخل غير المتزامنة الفعالة Low مع جهد التغذية كي تصبح غير فعالة. وكما سترى لاحقاً عند دراسة تطبيقات القلابات فإن المداخل غير المتزامنة تستخدم لتصفير كافة المسجلات (Registers) التي تتكون من مصفوفات من القلابات.

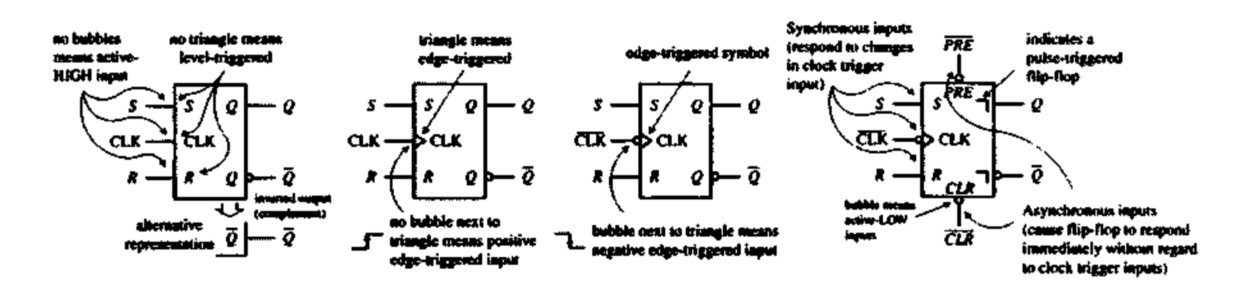


P̄R̄Ē	C̄L̄R̄	CLK	S	R	Q	Q̄	Mode
0	1	X	X	X	1	0	preset
1	0	X	X	X	0	1	cleared
0	0	X	X	X	1	1	not used (race)
1	1	⎍	0	0	Q	Q̄	hold
1	1	⎍	0	1	0	1	Reset
1	1	⎍	1	0	1	0	Set
1	1	⎍	1	1	1	1	not used (race)

الشكل (74.12): قلاب السيد والعبد.

قواعد عامة لفهم رموز القلابات المنطقية

تتوفر دارات متكاملة جاهزة للقلابات، لذلك لا ضرورة لبناء القلاب باستخدام بوابات، وللقلابات رموز خاصة بها كما كان للبوابات رموز خاصة بها، ويبيِّن الشكل (75.12) التمثيل الرمزي للقلابات، وهذه الرموز هي لقلابات SR ولكنها تنطبق أيضاً على قلابات D وJK التي سوف نناقشها لاحقاً.



الشكل (75.12): رموز قلابات SR.

2.6.12 الدارات المتكاملة لقلابات SR

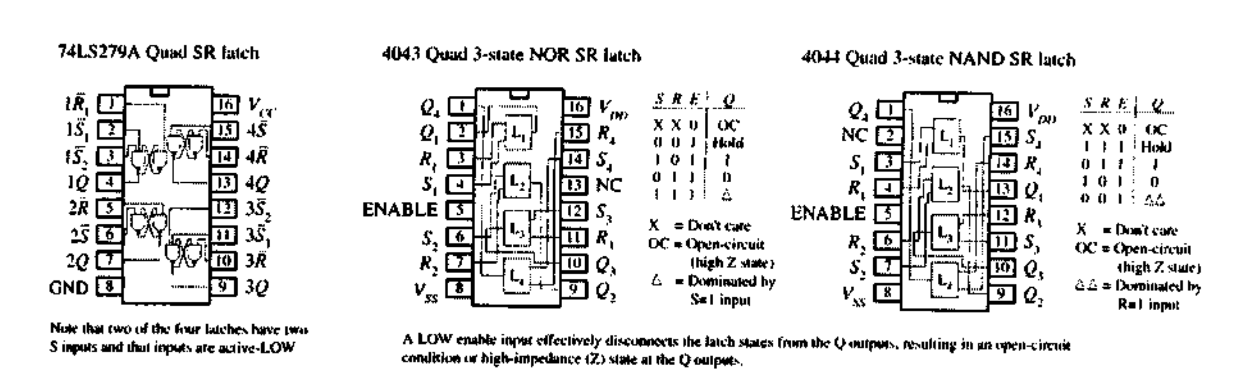
يبيِّن الشكل (76.12) بعض الدارات المتكاملة لقلابات SR (الماسكات).

تحوي الدارة 74LS297A على أربعة مواسك SR مستقلة، ولاحظ أن اثنين من هذه القلابات لها مدخل set (وضع) مستقل. تستخدم هذه الدارة المتكاملة عادة في مانعات ارتداد المفاتيح. تحوي الدارة 4043 أربعة ماسكات NOR SR ثلاثية الحالة ولكل ماسك مداخل set (وضع) وreset (إرجاع) خاصة به وخرج Q خاص به أيضاً. إن خاصية الخرج ثلاثي الحالة هي ميزة إضافية تمكنك من فصل كافة المخارج Q وجعلها تبدو كدارات مفتوحة (ممانعة عالية). تستخدم

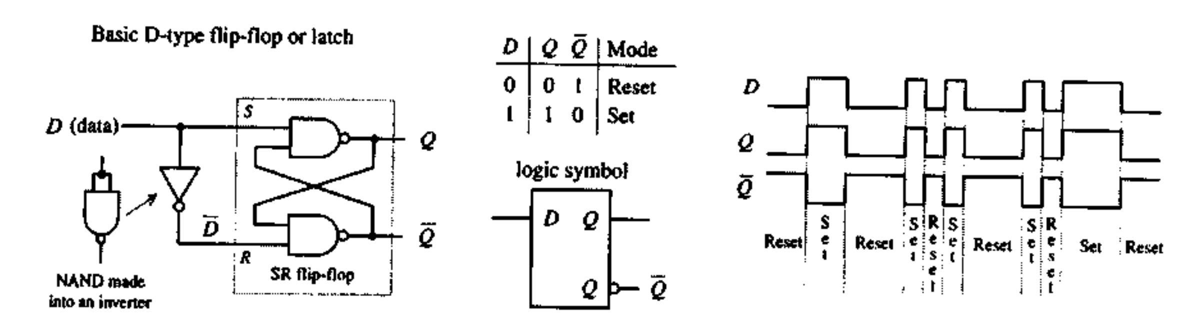
خاصية الخرج ثلاثي الحالة في التطبيقات التي توصل فيها عدة عناصر منطقية إلى ممر (باص bus) معطيات مشترك، وعندما توصل معطيات خرج أحد المواسك إلى الممر تفصل مخارج باقي الماسكات عنه بسبب حالة الممانعة العالية. الدارة المكاملة 4044 تشبه الدارة 4043 ولكنها تحتوي أربعة ماسكات NAND RS ذات مخارج ثلاثية الحالية.

3.6.12 قلابات D

القلاب D هو قلاب وحيد المدخل ويسمى Data Flip-Flop وهو بالأساس قلاب SR ولكن S تستبدل بالمدخل D وR تستبدل بـ $\overline{D}$ (D المعكوسة)، ويمكن الحصول على إشارة المدخل المعكوس من المدخل D بواسطة عاكس وتوصل الإشارة المعكوسة إلى المدخل R كما هو مبيَّن في الشكل (77.12) ويضمن العاكس عدم حدوث الحالة غير المحددة في الخرج (السبق race، أو الحالة غير المستخدمة R = 1؛ S = 1)، كما أن العاكس يلغي حالة المسك (hold) وبذلك تبقى فقط حالات الوضع (Set) عندما يكون (D = 1) والإرجاع (reset) عندما يكون (D = 0). تبيِّن الدارات الموجودة في الشكل (77.12) قلاب D يُقدح على المستوى (Level Triggered).



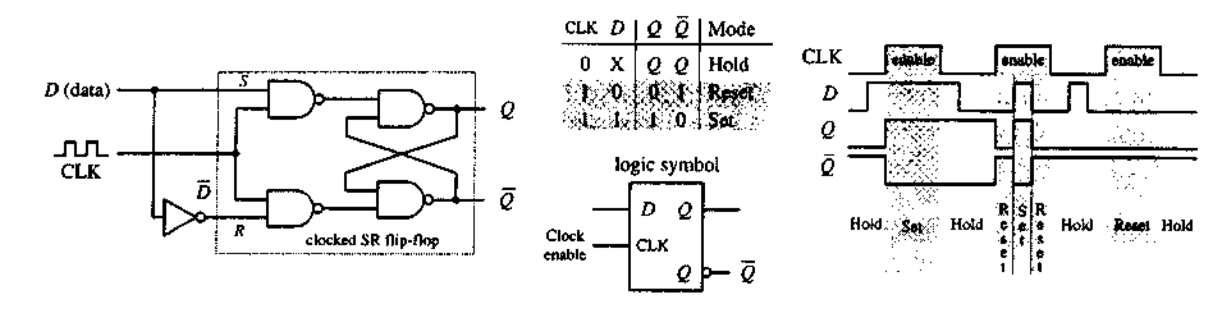
الشكل (76.12): بعض الدارات المتكاملة لقلابات SR (ماسكات).



D	Q	$\overline{Q}$	Mode
0	0	1	Reset
1	1	0	Set

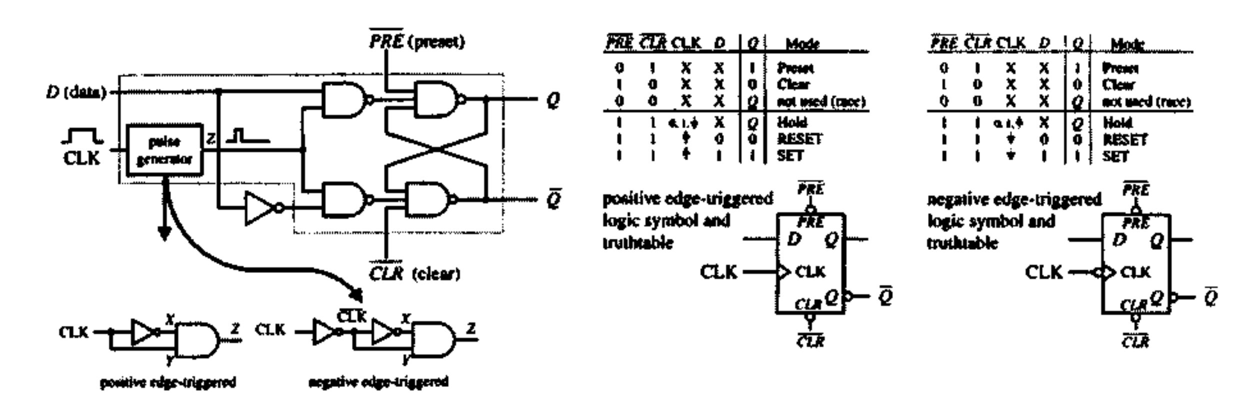
الشكل (77.12): دارات القلاب D الأساسي، رمز القلاب وإشارات الدخل والخرج.

يتم تشكيل قلاب D متزامن Clocked ويُقدح على المستوى بتعديل الدارة الأساسية لتصبح كما في الشكل (78.12)، ويُعطى في الشكل أيضاً رمز القلاب D المتزامن وإشارات الدخل والخرج.



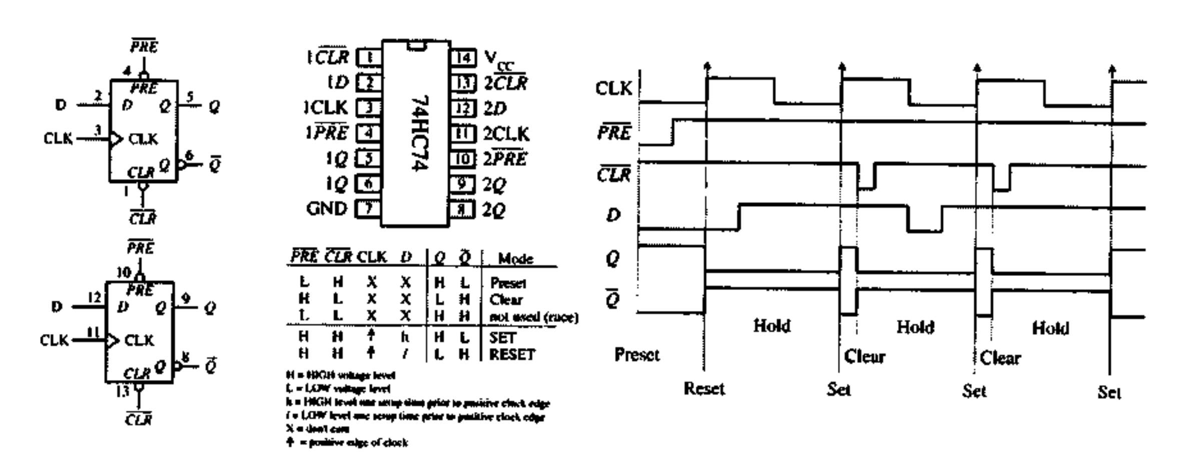
الشكل (78.12): دارة قلاب D متزامن ورمزه وأشكال دخله وخرجه.

وكذلك يمكن تكوين قلاب D متزامن يقدح على الجبهة (edge-triggered) حيث يُستخدم قلاب SR يُقدح على الجبهة وتضاف إليه دارة عاكس كما في الشكل (79.12).



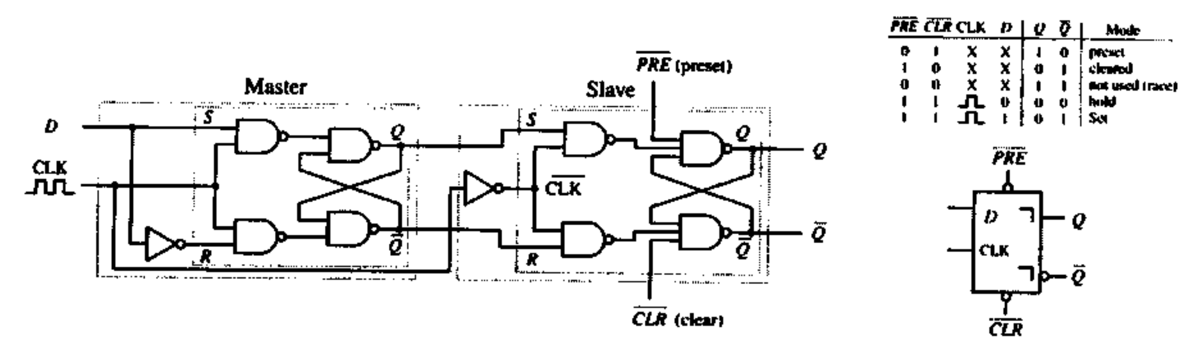
الشكل (79.12): دارة قلاب D يُقدح على الجبهة.

يبيِّن الشكل (80.12) الدارة المتكاملة 7474 (أو 74HC74) وهي عبارة عن قلابين D من النوع الذي يُقدح على الجبهة الصاعدة لنبضة Clcok مع مدخلي Clear (تصفير) ووضع قسري (Preset) غير متزامنين.



الشكل (80.12): الدارة المتكاملة 7474 وإشارات دخلها وخرجها.

عند النظر إلى جدول الحقيقة الموجود في الشكل (80.12) تلاحظ وجود الأحرف (l) و(h). الحرف h يشبه H لمستوى الجهد العالي، أما الحرف (l) فيشبه (L) لمستوى الجهد المنخفض، ولكن يوجد شرط إضافي يجب أن يتحقق كي يعمل القلاب D وفقاً لما هو مدون في جدول الحقيقة، وهذا الشرط هو وجوب ثبات حالة المدخل D على وضع (high) أو (Low) لفترة زمنية تساوي على الأقل (ts) قبل الجبهة الصاعدة لنبضة Clock وts هي setup time (زمن الإعداد) وينتج هذا الشرط من أزمنة تأخير الانتشار الفعلية في الدارات المتكاملة للقلابات، وإذا حاولت جعل القلاب ينتقل من حالة إلى حالة بسرعة عالية جداً (أي إذا لم تعط الإلكترونات الوقت الذي تحتاجه للحركة في كل حالة) فإنك ستحصل حتماً على قراءات غير صحيحة في الخرج. تبلغ قيمة زمن الإعداد (ts) في الدارة 7474 حوالي (20 ns)، ولذلك يجب أن لا تطبق على الدارة نبضات ضمن مجال الـــ (20 ns). وبالطبع فإن للقلابات الأخرى قيماً مختلفة لـــ (ts)، ولذلك يجب العودة إلى نشرات المعطيات التي تعطيها الجهات الصانعة. سوف نناقش زمن الإعداد (ts) وغيره من بارامترات القلاب بالتفصيل في نهاية هذه الفقرة، تتوفر قلابات D التي تُقدح نبضياً (pulse-triggered) من نوع السيد والعبد (master-slave)، ونذكرك هنا بأن القلاب الذي يُقدح نبضياً يحتاج إلى نبضة Clock كاملة قبل أن تظهر معطيات الخرج على الدخل، ويبيِّن الشكل (81.12) الدارة الأساسية لقلاب D يُقدح نبضياً وهو مشابه تماماً لقلاب SR يقدح نبضياً ولكن أضيفت إليه دارة عاكس في الدخل.



$\overline{PRE}$	$\overline{CLR}$	CLK	D	Q	$\overline{Q}$	Mode
0	1	X	X	1	0	preset
1	0	X	X	0	1	cleared
0	0	X	X	1	1	not used (race)
1	1	⎍	0	0	0	hold
1	1	⎍	1	0	1	Set

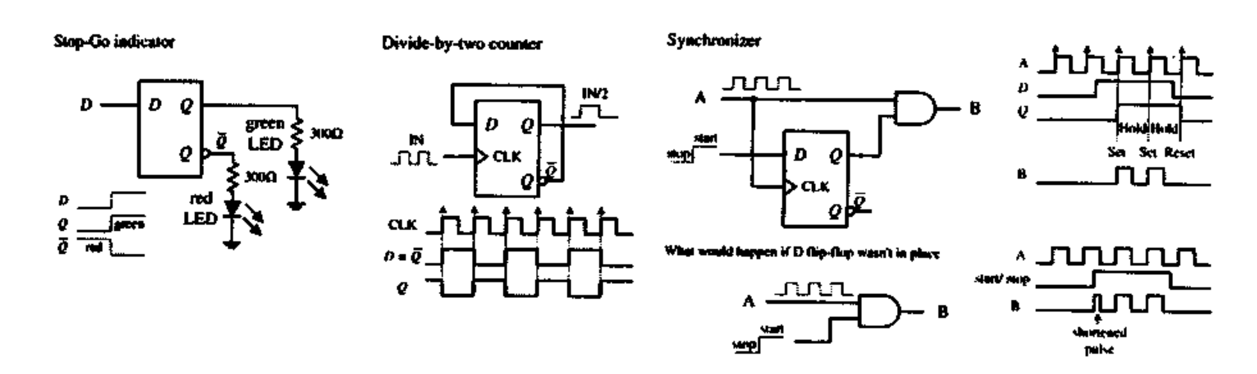
الشكل (81.12): الدارة الأساسية لقلاب D يقدح نبضياً.

4.6.12 بعض التطبيقات البسيطة للقلاب D

في دارة مبيِّن Stop-Go المعطاة في الطرف اليساري من الشكل (82.12) يُستخدم قلاب D بسيط يُقدح على المستوى (Level-Triggered) لتفعيل ديود أحمر مصدر للضوء (LED) ونقله إلى حالة (on) عندما يكون المدخل D في حالة (Low) ولنقل LED أخضر إلى حالة (on) عندما يكون المدخل D في حالة (high)، وبالتالي فإن LED واحداً في خرج الدارة يكون في حالة (on) في لحظة ما. يعمل القلاب D المعطى في وسط الشكل (82.12) كعداد (counter) مقسِّم على (2) وهو عبارة عن قلاب يُقدح على الجبهة الصاعدة لنبضة Clock. إن مبدأ عمل الدارة بسيط جداً ويتضح من المخطط النبضي المعطى تحت الشكل، وبما أن معطيات الدخل $D = \overline{Q}$ تنتقل إلى الخرج مع الجبهة الصاعدة لنبضة Clock فإنه تظهر في الخرج نبضة واحدة مقابل كل نبضتي Clock والدارة تعمل كمقسِّم على (2).

تستخدم دارة المزامن (synchronizer) عند الرغبة في استخدام إشارة تحكم خارجية غير متزامنة (يتم توليدها بواسطة مفتاح مثلاً) لقيادة عملٍ معين ضمن منظومة متزامنة. يقدم المزامن الوسيلة اللازمة للحفاظ على طور العمل الذي تقوده الإشارة الخارجية متزامناً مع النظام المتزامن. لنفرض، على سبيل المثال، أنك تريد استخدام إشارة تحكم غير متزامنة للتحكم بعدد النبضات التي تنتقل من النقطة (A) إلى النقطة (B) ضمن النظام المتزامن، ومن أجل ذلك قد تفكر باستخدام بوابة تمكين كما هو مبيِّن تحت دارة المزامن في الشكل (82.12)، ولكن وبما أن إشارة التحكم الخارجي غير متزامنة (غير

متوافقة طورياً) مع نبضات Clock، فإنك وعند تطبيق إشارة التحكم قد تُقلل زمن أول أو آخر نبضة Clock، كما هو موضح في المخطط النبضي، وفي بعض التطبيقات لا يعتبر ذلك محبذاً ولا يعمل التطبيق بالشكل المناسب. يستخدم قلاب D يقدح على الجبهة للتخلص من هذه المشكلة. تؤخذ نبضات Clock للقلاب D من خط نبضات Clock الدخل، أما إشارة التحكم الخارجية فتطبق على المدخل D للقلاب ويوصل الخرج Q للقلاب مع مدخل التمكين لبوابة AND. عند استخدام هذه الدارة لن يكون هناك تقليل لزمن النبضة الأولى أو الأخيرة لأن القلاب D لن يُعطي نبضات تمكين لبوابة AND غير متطابقة صفحياً مع نبضات Clock، وذلك لأن القلاب D وبعد الجبهة الصاعدة لنبضة Clock المطبقة عليه يهمل تغيرات الإشارة المطبقة على مدخله D ويستمر ذلك حتى ورود الجبهة الصاعدة لنبضة Clock التالية.

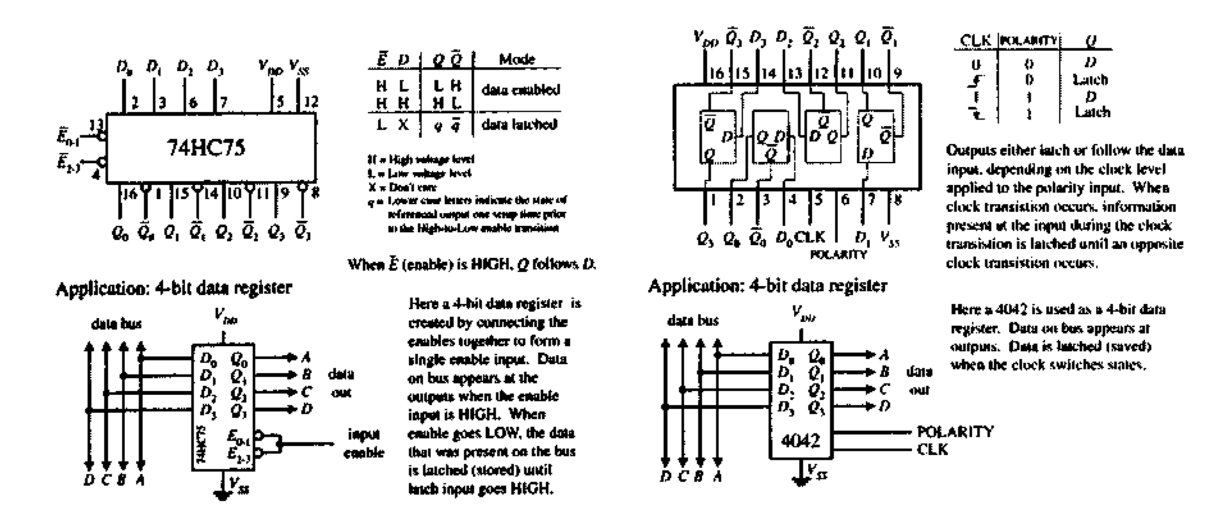


الشكل (82.12): بعض التطبيقات البسيطة للقلاب D.

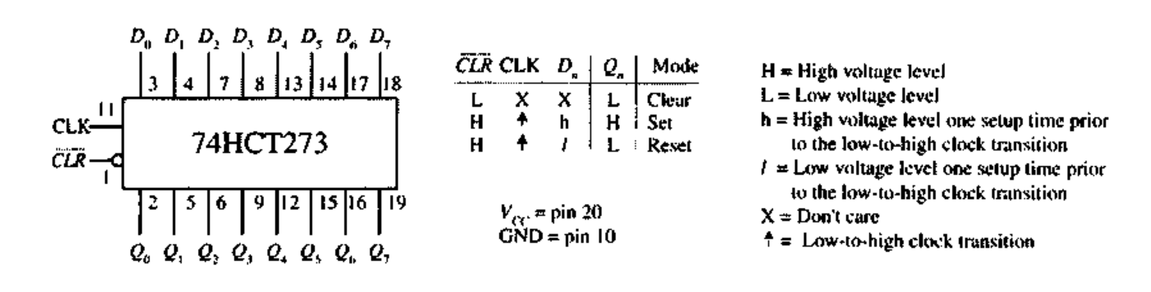
5.6.12 قلابات D الرباعية والثمانية

تجد غالباً عدداً من القلابات D أو الماسكات D في دارة متكاملة واحدة، فمثلاً تحوي الدارة المتكاملة 74HC75 أربعة ماسكات D شفافة (transparent D latches). تتشارك الماسكات (0) و(1) بمدخل تمكين (Low) E_0 - E_1، أما الماسكات (2) و(3) فتتشارك بمدخل تمكين (Low) E_2 - E_3، ومن جدول الحقيقة تلاحظ أن خرج كل ماسك يطابق الحالة المنطقية للدخل عندما يكون مدخل التمكين الخاص به في حالة (high)، أما عند انتقال مدخل التمكين إلى حالة (Low) فإن الخرج يمسك على الحالة الموافقة للدخل والتي تسبق لحظة انتقال مدخل التمكين من high إلى Low بزمن إعداد واحد (ts). تحوي الدارة المتكاملة 4042 على أربعة ماسكات D، ويبيّن الشكل الموجود تحت الدارة كيفية عمل هذه الماسكات. تستخدم الماسكات D بشكلٍ عام كمسجلات معطيات في النظم التي تحوي ممرات، ويشرح الشكل (83.12) التفصيلات.

توجد دارات متكاملة ICs تحوي بداخلها ثمانية قلابات D وتستخدم هذه الدارات غالباً كمسجلات معطيات 8-bit في نظم المعالجات الصغرية (microprocessor systems) حيث تتشارك العناصر والدارات على ممرات معطيات (8-bit) أو (16-bit = 8 × 2)، والدارة المتكاملة 74HCT273 المبينة في الشكل (84.12) هي مثال على ذلك. تشترك كافة قلابات هذه الدارة المتكاملة على مدخل Clock واحد وكلها من النوع الذي يقدح على الجبهة الصاعدة، وكذلك تشترك بمدخل تصفير واحد فعال في حالة (Low). عند ورود الجبهة الصاعدة لنبضة Clock تنتقل الحالات المنطقيَّة للمداخل D_0 وحتى D_7 إلى المخارج Q_0 وحتى Q_7 على الترتيب وتظهر على المخارج، يُطبق (Low) على مدخل التصفير من أجل تصفير مخارج كافة القلابات. سنتطرق مرة ثانية للقلابات الثمانية ولغيرها من العناصر (devices) التي تستخدم في النظم التي تحوي ممرات لاحقاً في هذا الفصل.



الشكل (83.12): دارات متكاملة تحوي (4) أو ثمانية قلابات D



الشكل (84.12): الدارة المتكاملة 74HCT273.

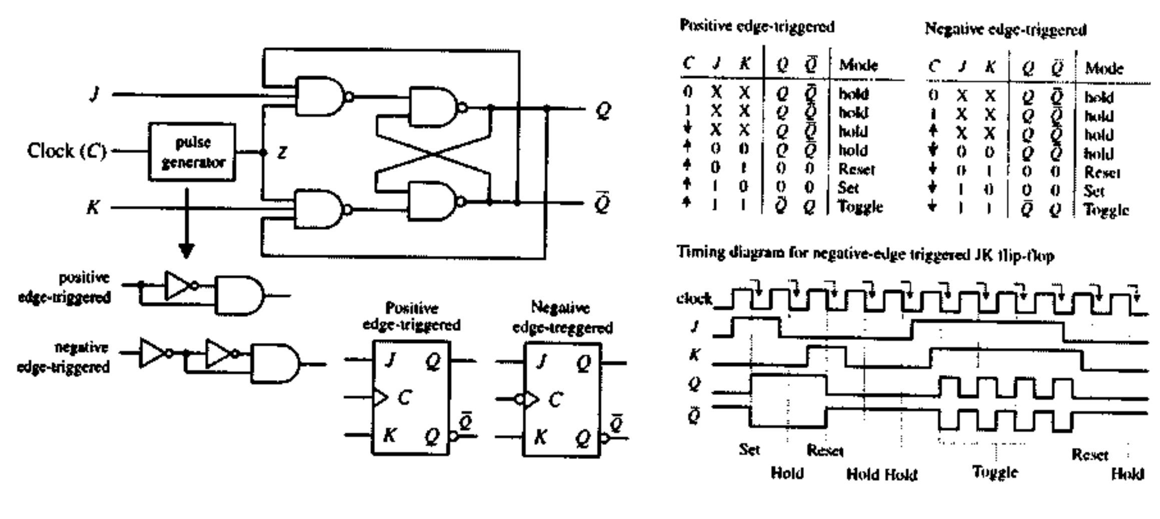
6.6.12 قلابات JK

سنتعرف في هذه الفقرة على القلاب JK، وهو مشابه للقلاب SR، حيث تعمل (J) كـ (S) وتعمل (K) كـ (R)، وبالمثل فإن له نمط وضع (K = 0، J = 1)، ونمط إرجاع (K = 1، J = 0) ونمط مسك (hold mode) وفيه يكون (K = 0؛ J = 0)، ولكن وبعكس القلاب SR الذي كانت فيه حالة غير محددة عند (R = 1، S = 1) فإن القلاب JK فيه حالة انتقال أو نمط انتقال (toggle mode) عندما يكون K = 1، J = 1 وعندها تنتقل المخارج Q و $\overline{Q}$ إلى حالات معاكسة مع كل نبضة Clock فعالة. يبيِّن الشكل (85.12) التعديلات اللازمة لتحويل دارة قلاب SR إلى قلاب JK حيث تستخدم تغذية عكسية متصالبة من الخرج إلى الدخل، وهذه التغذية العكسية تجعل القلاب JK يُقدح فقط على الجبهة (لا يمكن قدح القلاب JK على المستوى). يبيِّن الشكل (85.12) كيفية تكوين قلاب JK يُقدح على الجبهة باستخدام قلاب SR مكون من بوابات NAND.

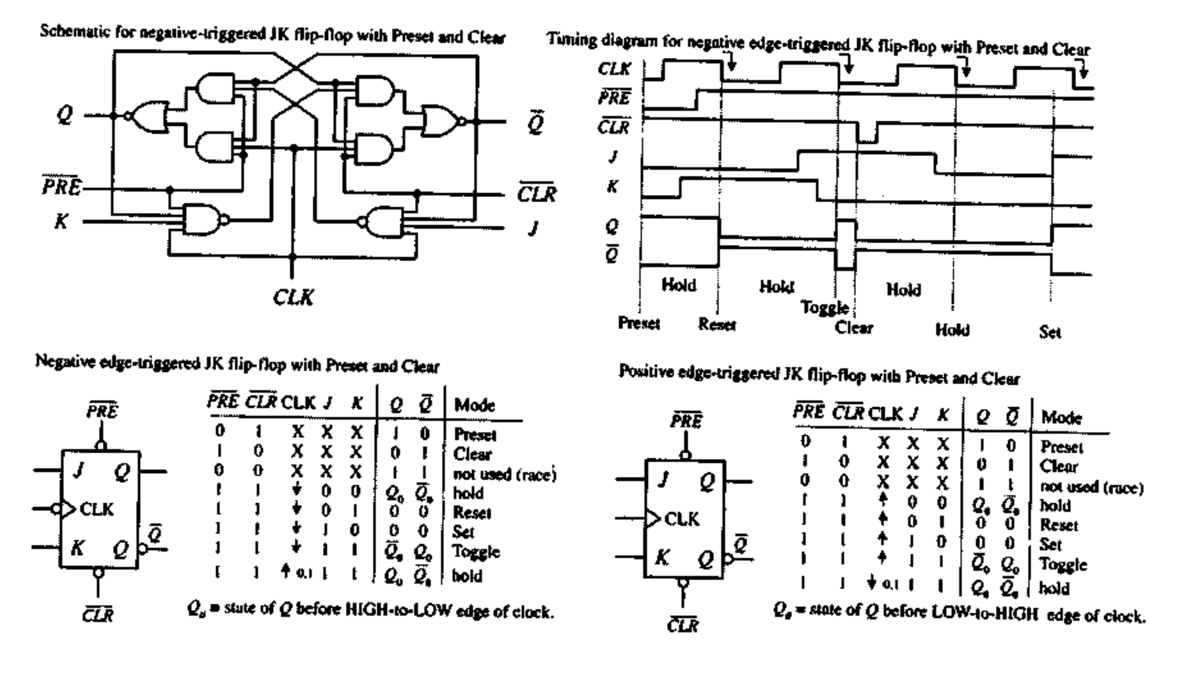
تتوفر قلابات JK بمداخل تصفير (Clear) وإرجاع (reset) غير متزامنة، انظر الشكل (86.12).

توجد أيضاً قلابات (سيد ـــ وعبد) تقدح نبضيّاً، ولكن هذه القلابات ليست شائعة الاستخدام كقلابات JK التي تقدح على الجبهة وذلك بسبب تأثير غير مرغوب سنشرحه لاحقاً. وهذه القلابات تشبه قلابات SR التي تقدح نبضيا (pulse-triggered) مع وجود التغذية العكسيَّة التصالبية المميزة للقلاب JK من المخارج Q و $\overline{Q}$ إلى بوابات دخل السيد (master input gates). يبيِّن الشكل (87.12) قلاب JK بسيطاً يُقدح نبضياً ومكوَّناً من بوابات NAND.

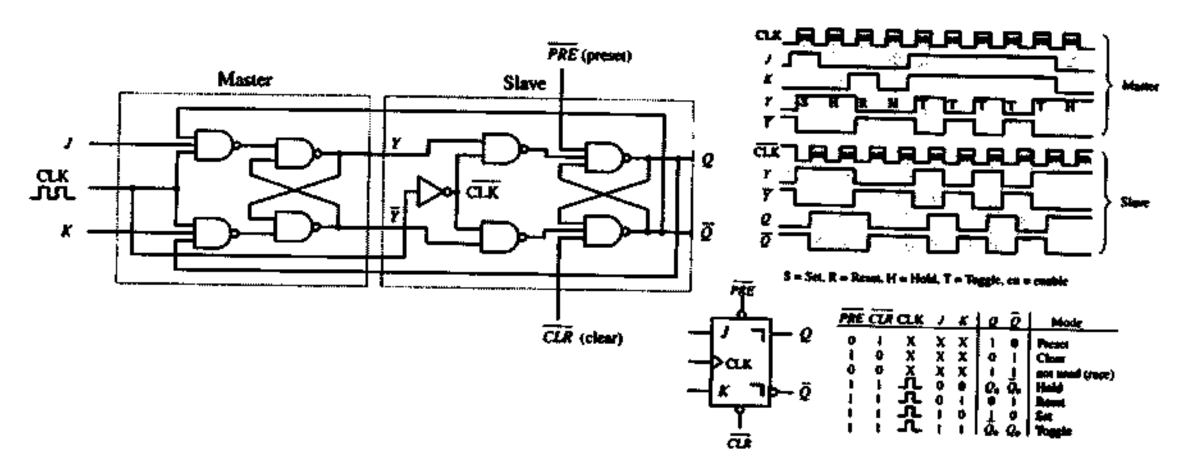
توجد مشكلة في قلابات JK التي تقدح نبضياً وهي مشكلة التقاط النبضات غير المرغوبة الناتجة عن الضجيج الكهروساكن الذي يظهر على (J) و(K) عندما تكون نبضات Clock في حالة high ويعتبر القلاب هذه النبضات معطيات حقيقيَّة، وتسمى هذه المشكلة ones catching، ولا تظهر هذه المشكلة إذا كانت نبضات Clock ذات استمرارية قصيرة، وتظهر فقط إذا كانت نبضات Clock طويلة الاستمرارية وعندها يجب مراقبة ظهور هذه المشكلة، ويفضل استخدام القلاب JK الذي يقدح على الجبهة لتلافي هذه المشكلة.



الشكل (85.12): قلاب JK.



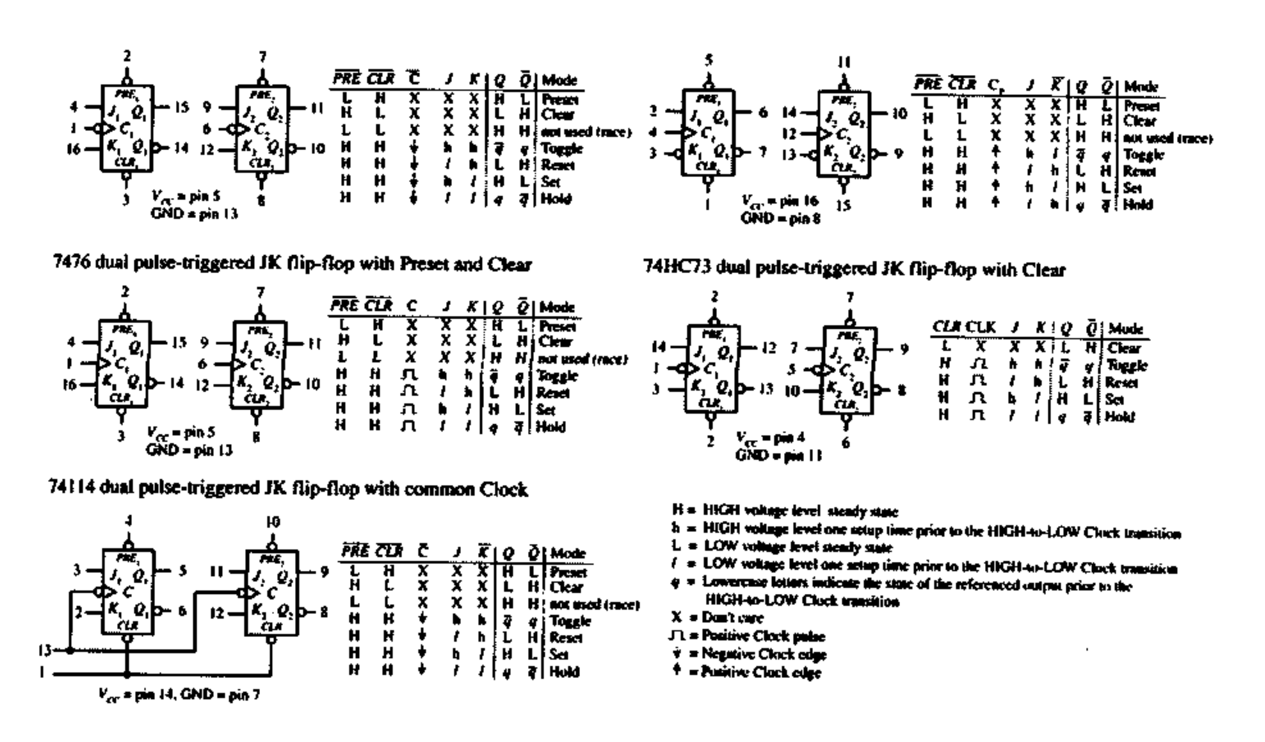
الشكل (86.12): قلابات JK بمداخل تصفير ووضع قسري.



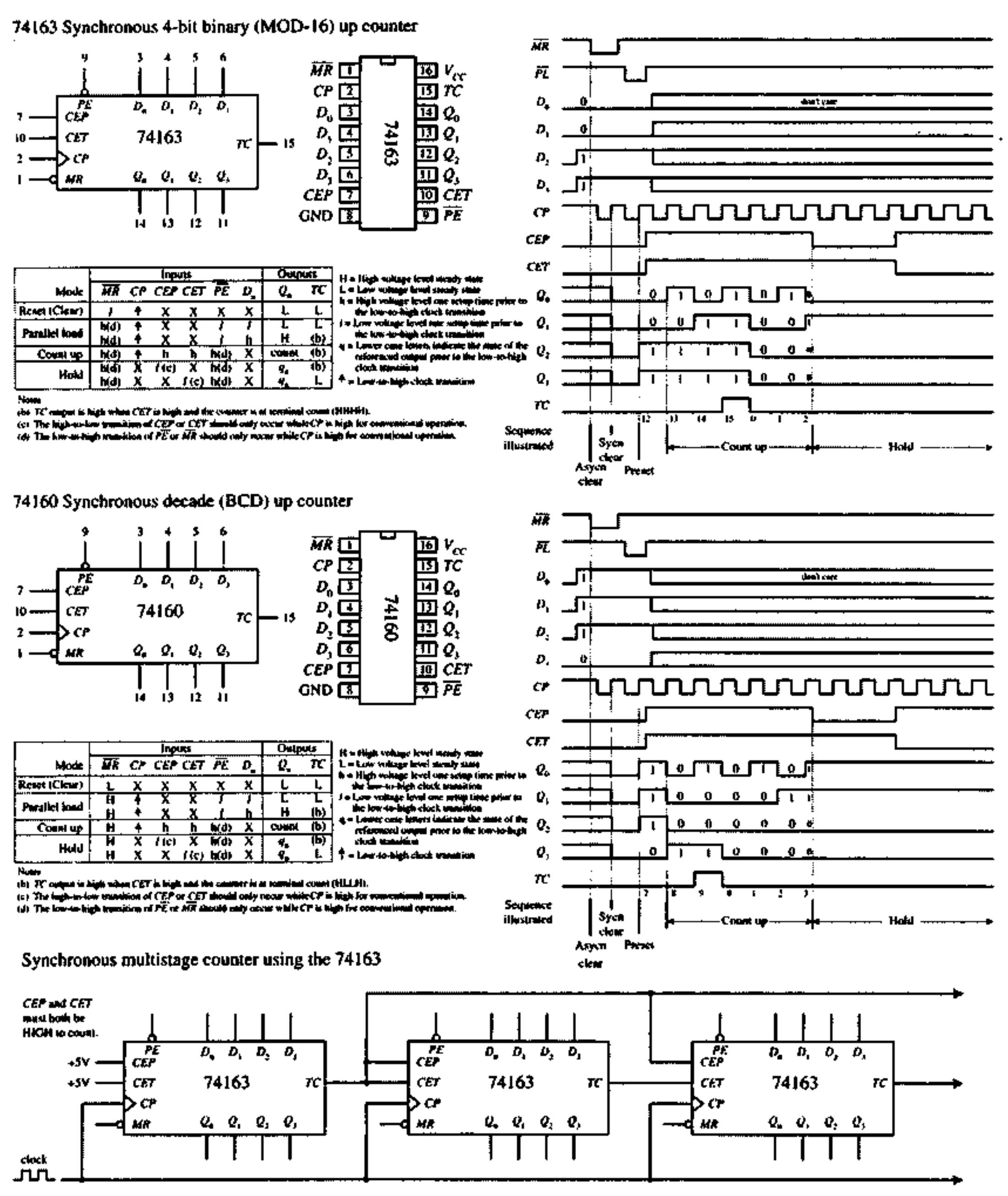
الشكل (87.12): قلاب JK يقدح نبضياً (سيد ـ وعبد).

بعض الدارات المتكاملة لقلابات JK

يبيِّن الشكل (88.12) بعض الدارات المتكاملة لقلابات JK مثل الدارة المتكاملة 74LS76 التي تحوي قلابين JK يقدحان على الجبهة الهابطة ومزودة بمداخل تصفير ووضع قسري Clear وPreset، وكذلك الدارة المتكاملة 74109 التي تحوي قلابين JK يقدحان على الجبهة الصاعدة ولهما مداخل Clear وPreset. تحوي الدارة 7476 قلابين JK يقدحان نبضياً ولكل منهما مدخلان Preset وClear، أما الدارة 74114 فتحوي قلابين JK يُقدحان نبضياً ولهما مدخل Clock مشترك. الدارة المتكاملة 74HC73 مكوَّنة من قلابين JK مزودين بمداخل Clear وPreset وتقدح هذه القلابات نبضياً.



الشكل (88.12): دارات متكاملة لقلابات JK.

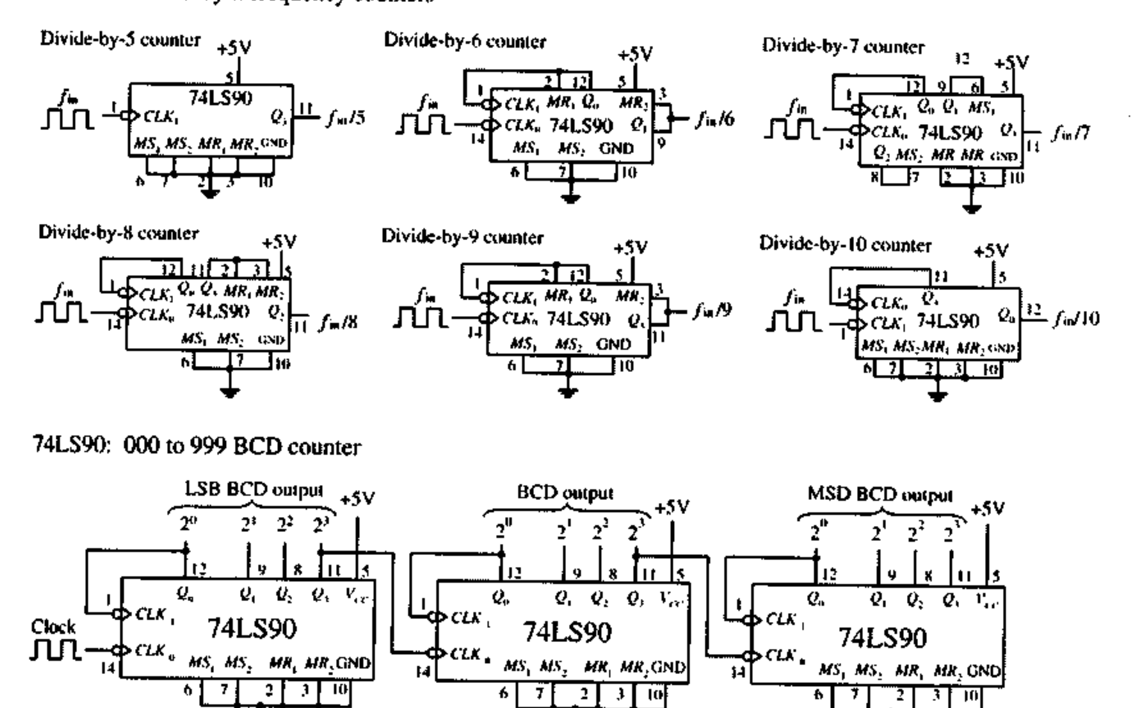


الشكل (108.12): دارات العدادات 74163 و74160.

تطبيقات العدادات غير المتزامنة

تبيِّن الدارة المعطاة في الشكل (109.12) مجموعة من العدادات غير المتزامنة باستخدام الدارة المتكاملة 74LS90 وتعمل هذه العدادات كعدادات (divided by-5 counter) يعد حتى (5) وعداد MOD-6، عداد MOD-7، وعداد MOD-8، عداد MOD-9، وعداد MOD-10، وعداد متعدد المراحل يعد من 000 وحتى 999 بنظام BCD.

Asynchronous Counter Applications



الشكل (109.12): بعض تطبيقات العدادات غير المتزامنة.

مولد نبضات Clock بترددات 60 Hz، 10 Hz و1 Hz

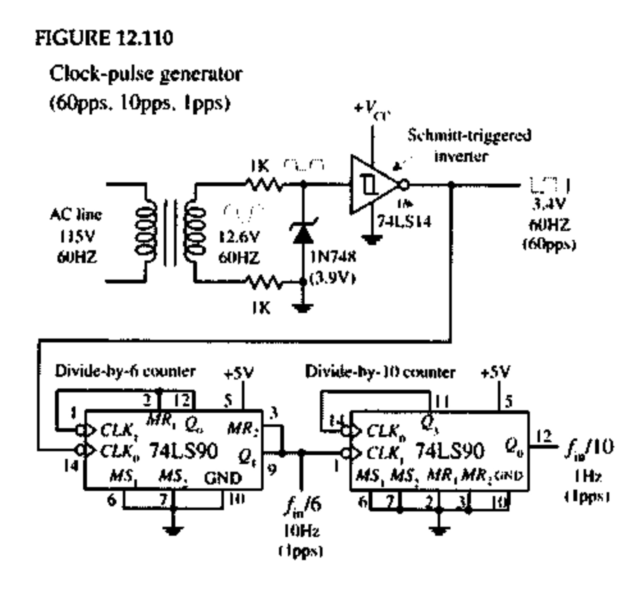
إن دارة مولد نبضات Clock الموضحة في الشكل (110.12) تؤمن في خرجها نبضات Clock بترددات 60 Hz و10 Hz و1 Hz وتستخدم هذه النبضات في التطبيقات التي تحتاج إلى عد في الزمن الحقيقي. وتعتمد الفكرة الأساسية على الاستفادة من جهد شبكة المدينة ذي التردد 60 Hz (في الولايات المتحدة الأمريكيَّة) ويتم تخفيض جهد شبكة المدينة بواسطة محول خافض إلى (12.6 V) ويحدَّد مستوى جهد الخرج بواسطة ثنائي زينر على جهد 3.9 V (الذي يعمل كمثبت جهد وكمقوم في آن واحد والغاية من الزينر هي تحديد الجهد على مدخل عاكس قادح شميت بحيث لا يزيد عن القيمة الأعظمية المسموحة وتقوم بوابة العاكس بتحويل النبضات المحددة في الدخل إلى نبضات مربعة. يكون جهد خرج العاكس حوالي (0.2 V) إذا كان جهد دخله الموجب أكبر من جهد العتبة (1.7 V ≅) + V_T وينتقل الخرج إلى حالة high (تقريباً 3.4 V) إذا انخفض جهد الدخل إلى ما دون المستوى (0.9 V ≅) - V_T. يتم الحصول على نبضات بتردد 60 Hz من خرج العاكس (أي 60 نبضة في الثانية) ومن أجل الحصول على تردد 10 Hz (أو عشر نبضات في الثانية) يتم استخدام عداد 74LS90 يعمل كعداد (divided-by-6) مقسم على (6) وبتطبيق خرج هذا العداد على مدخل عداد آخر 74LS90 يعمل كعداد مقسم على (10) (divided-by-10) يتم الحصول على تردد 1 Hz (أي نبضة واحدة في الثانية).

في الشكل (111.12) تستخدم ثلاث دارات متكاملة 74LS90 موصولة مع بعضها لتكوين عداد عشري لثلاث خانات، وعلى دارة متكاملة تعمل كعداد MOD-10، ومن الجدير بالتنويه هنا وجود دارة RC تعمل على تصفير العداد عن طريق مدخل التصفير الأساسي (Master Reset Input) عند وصل التغذية. قبل بدء العد يكون $\overline{Q}$ للقلاب D في حالة high ويمنع ذلك نبضات Clock من الوصول إلى مدخل Clock لأول عداد. عند إغلاق مفتاح الضغط (pushbutton)، ينتقل $\overline{Q}$ للقلاب D إلى حالة Low ويمكِّن العداد الأول من العد. يُطبق خرج كل عداد (بنظام BCD إلى دارة متكاملة تعمل

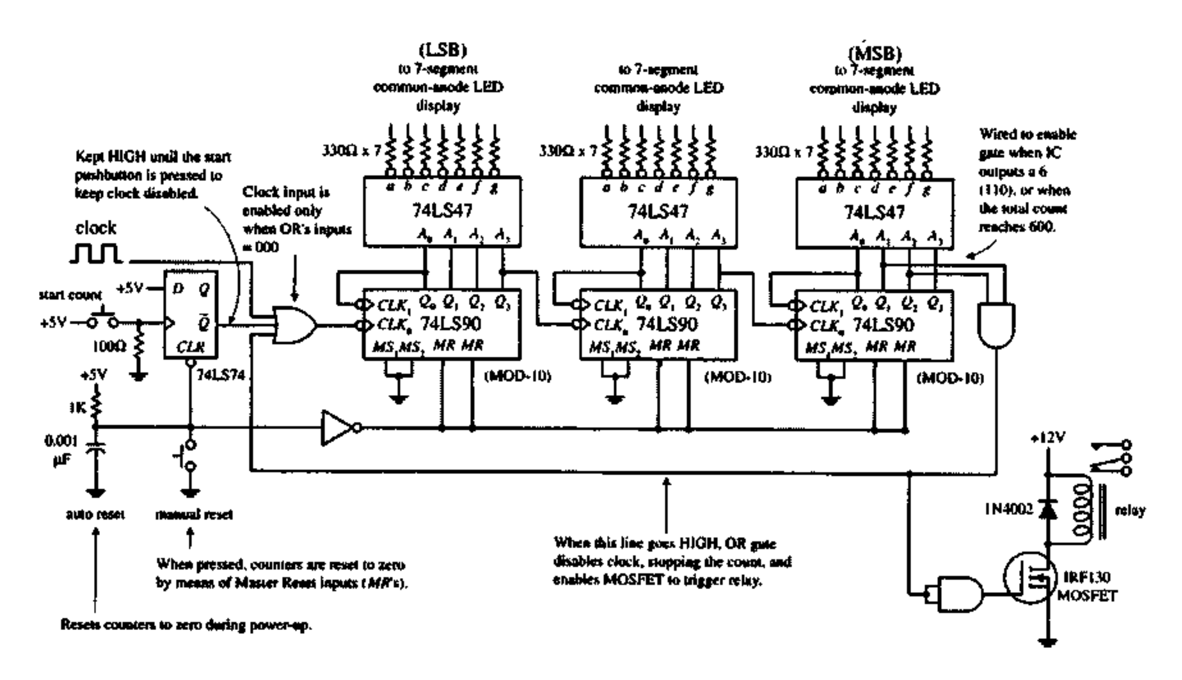
ككاشف/وفاك ترميز من BCD إلى إظهار سباعي القطع، وتقود هذه الدارة وحدة الإظهار. خرج العداد اليساري يمثل خانة الــ LSB أما خرج العداد اليميني فيمثل خانة الــ MSB. يُوصل خرج العداد الأخير بحيث تُفعَّل بوابة AND عندما يصل العد إلى (600) ويؤدي ذلك إلى جعل بوابة OR ثلاثية المداخل تلغي تفعيل نبضات Clock، ويتوقف العد كما يتم تفعيل حاكمة Relay.

يمكن تصفير العداد بالضغط اللحظي على مفتاح التصفير اليدوي (manual reset).

60-Hz, 10-Hz, 1-Hz Clock-Pulse Generator



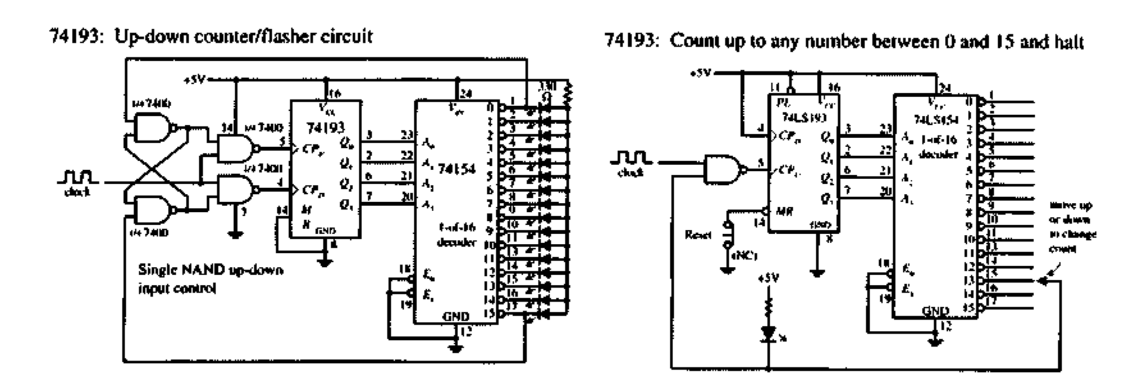
الشكل (110.12): مولد نبضات Clock بترددات 60، 10 و1 Hz.



الشكل (111.12): عداد عشري ثلاثي الخانات يعد من (0) حتى (600).

تطبيقات العدادات المتزامنة

تُعطى في الشكل (112.12) مجموعة من دارات العدادات المتزامنة التي توضح تطبيقات هذه العدادات، والدارات الموجودة في الشكل هي:



الشكل (112.12): بعض أنواع العدادات المتزامنة كتطبيقات متنوعة.

- دارة عداد 74193 يعمل كعداد صاعد/هابط (دارة أضواء وماضة) والدارة مصممة بحيث يعد العداد من (0000) إلى (1111) ثم ينتقل للعد من (1111) إلى (0000) ويعود بعد ذلك للعد التصاعدي. تؤمن بوابة NAND التحكم اللازم لقيادة العد إلى تصاعدي أو تنازلي. أما الدارة 74154 فهي عبارة عن دارة كاشف (1) من (16) ويُطبق خرج العداد على مداخل العنونة لهذه الدارة وبذلك يصبح أحد المخارج الموافقة للعنوان (للعدد الذي وصل إليه العداد) في حالة Low ويسمح ذلك للديود المصدر للضوء LED بالإضاءة.
- دارة عداد 74193 وتعد هذه الدارة إلى أي رقم بين (0) و(15) وتتوقف ويُضاء LED في هذه العملية. يُستخدم في الدارة كاشف (1) من (16) لتحويل خرج دارة العداد المكوَّن من (4) خانات إلى رقم خرج مفرد يتوافق مع العدد المكوَّن من (4) خانات. الدارة المعطاة في الشكل تعد تصاعدياً حتى (13)، وعندما يصل العد إلى (13) فإن كل مخارج الكاشف تكون (high) ماعدا الخرج (13)، وفي هذه الحالة يُلغى تفعيل بوابة NAND وتمنع نبضات Clock من الوصول إلى المدخل CPu.
- دارة عداد 74193 كعداد مقسم على (n). وفي هذه الدارة يتم وضع مداخل المعطيات بواسطة المفاتيح على (13)، أو (1101) ويعد العداد تنازلياً من (13) إلى (0)، وهذا يعني أن الخرج TC_D ينتقل إلى حالة Low كل (13) نبضة Clock وكل (13) نبضة يُقدح المدخل PL فيقرأ الدخل مرة ثانية وتتكرر عملية العد التنازلي.
- دارة عداد نوع 74193 مقسم على n.

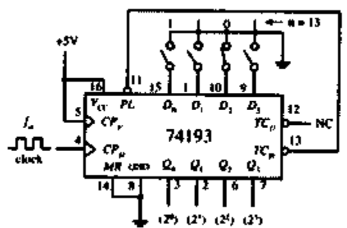
يوصل عدادان 74193 مع بعضهما للحصول على عداد تنازلي بثماني خانات وقد تم تحميل العداد مسبقاً بالعدد (120) ويقوم العداد بالعد من هذا العدد إلى الصفر. وبعد الدورة الأولى من العد يقوم العداد بالعد من 119 إلى الصفر وهذا يقابل 120 نبضة Clock بين نبضات Low للخرج الثاني TC_D.

- دارة عداد 7493 عداد MOD-16 بأربع خانات. ويعد هذا العداد من 0 (1111) إلى 15 (1111) ويكرر العد. عندما يكون أي من المخارج Q في حالة Low يضاء الديود الضوئي الموصول معه. يتم تصفير كافة مخارج العداد بالضغط اللحظي على مفتاح التصفير (Reset).
- مؤقت قابل للبرمجة يعد بشكل تنازلي (العد الأعظمي من 9 إلى 0). تستخدم المفاتيح S_1 حتى S_4 لوضع المداخل D_0 وحتى D_3 على الدخل المطلوب الموافق للعدد وبالضغط على (S_5) يتم تحميل العدد في العداد ويبدأ العد، وعند انتهاء

العد (الوصول إلى 0000) ينتقل TC_D إلى HIGH ويلغي تفعيل بوابة NAND وهذا يؤدي إلى توقيف العد وإلى إضاءة الديود المصدر للضوء LED. تستخدم دارة كاشف 7447 للتحويل من BCD إلى خرج يناسب وحدات الإظهار سباعي القطع كي تراقب ناتج العد على وحدة الإظهار.

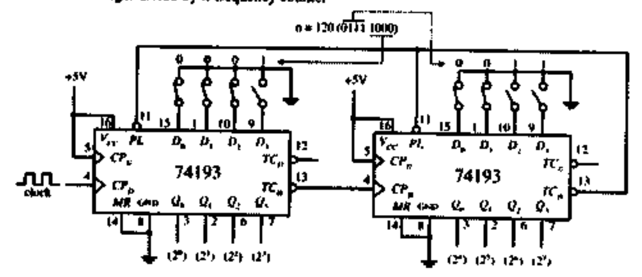
- الدارة الأخيرة في الشكل هي دارة عداد يعمل على دارات متكاملة 74160 (عدادات) وكواشف من BCD إلى إظهار سباعي القطع ويمكن استخدام هذا العداد للعد من (0) وحتى (999).





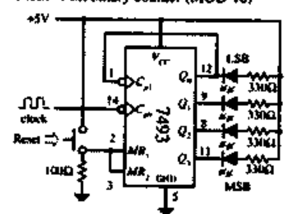
Here the switches set the data input to 1101 (13), and the counter will count down from 13 to 0. This means that the TC_D output will go LOW every 13th CP_D pulse. When TC_D goes LOW, the PL input is triggered and the data input 1101 is read again, and the countdown is repeated.

74193: A larger divide-by-n frequency counter



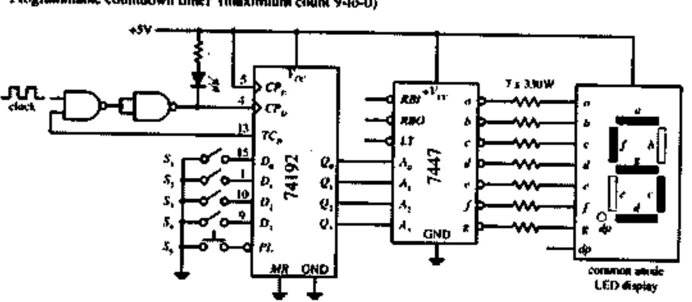
By cascading two 4-bit 74193 IC's together we get an 8-bit down-counter. Here we preload the 8-bit counter with the equivalent of 120 and count down to zero and then repeat. Actually, after the first cycle, the counter counts from 119 down to 0 to give us 120 complete clock pulses between LOW pulses on the second TC_D output.

7493: 4-bit binary counter (MOD-16)



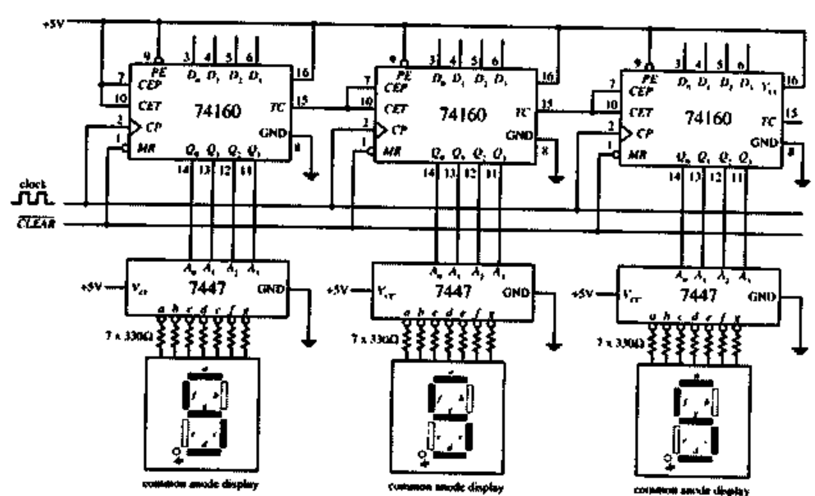
Counts from 0 (LLLL) to 15 (HHHH) and repeats. When a Q output goes LOW, corresponding LED turns ON. Reset counter to zero by pressing Reset switch.

Programmable countdown timer (maximium count 9-to-0)



Use switches S_1-S_4 to set D_0-D_3 to the desired count. Press S_5 to load D_0-D_3 and start (or reset) count. When the count is finished (reaches 0000), TC_D goes HIGH, disabling the first NAND gate. This stops the count and causes the LED to light up. The BDC-to-7 segment decoder/driver IC and LED display allow you to see the count in decimal form.

Cascading 74160 BCD counters together to make a 0 to 999 counter



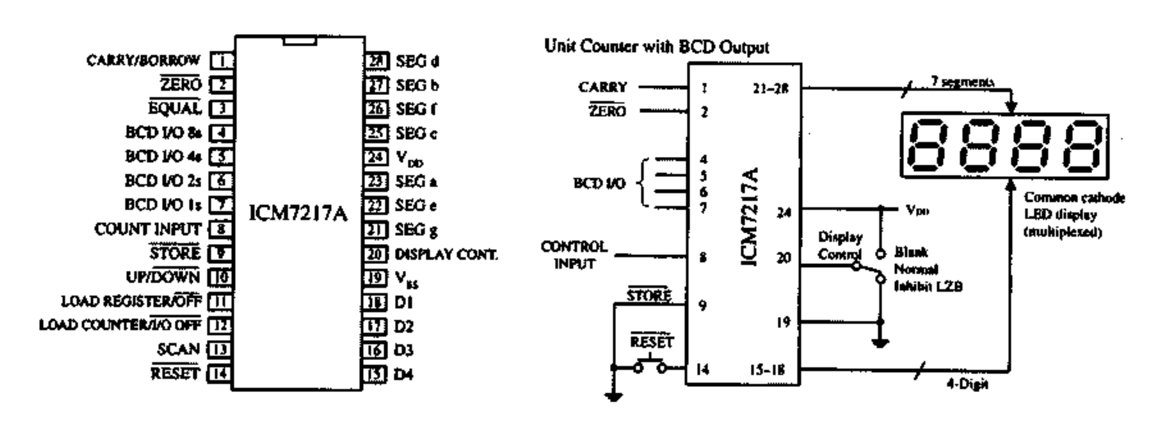
الشكل (113.12)

3.7.12 ملاحظة عن العدادات المزودة بوحدات إظهار

إذا أردت بناء عداد يستطيع إظهار عدة أرقام باستخدام الطريقة السابقة، فإنك تحتاج إلى عدة دارات متكاملة منفصلة لتوصلها مع بعضها (وكمثال على ذلك ضرورة استخدام كاشف من BCD إلى وحدة إظهار سباعي القطع لكل رقم digit).

والطريقة الأفضل في هذه الحالة هي استخدام المتحكم الصغري (Micro Controller) الذي يعمل كعداد وقائد لوحدة الإظهار (display driver) وقد وجدنا أن كاشفاً من BCD إلى إظهار سباعي القطع يؤمن إضاءة القطاعات المطلوبة من وحدة الإظهار، ولكن ما يقوم به المتحكم الصغري هو توزيع الإظهار. توصل ديودات الإظهار في وحدات الإظهار العادية (display units) إما بوصلة مصعد مشترك أو مهبط مشترك أي توصل مصاعد أو مهابط الديودات كلها مع بعضها وتخرج من وحدة الإظهار خطوط بمعدّل خط لكل قطاع وبذلك يكون عدد الخطوط التي تخرج من وحدات الإظهار لأربعة أرقام مساوية 28 خطاً للقطاعات و4 خطوط مشتركة. أما في وحدات الإظهار من النوع multiplexed display فإنه يتم وصل القطاعات المتطابقة من كافة الوحدات مع بعضها، أما الخط المشترك لكل رقم فإنه يكون منفصلاً وبذلك يكون عدد الخطوط التي تخرج من وحدات إظهار لأربعة أرقام ومن النوع multiplexed display هو فقط (11 = 4 + 7) خطاً وما يقوم به المتحكم الصغري هو تأمين إضاءة القطاعات المطلوبة واحداً بعد الآخر وبسرعة كافية تجعلها تبدو وكأنها مضاءة دوماً، ومن أجل تحقيق التوزيع يجب على برنامج المتحكم الصغري أن يؤمن المعطيات الصحيحة إلى خطوط القطاعات في نفس الوقت الذي يُفعَّل فيه رقم معيَّن عن طريق إشارة تحكم تُرسل إلى خط مشترك للرقم. سوف نشرح هذا النوع من التوزيع بتفصيل أكثر في الملحق H.

وهناك طريقة أخرى لتكوين عدادات متعددة الأرقام (multidigits) عن طريق استخدام دارة متكاملة IC تعمل كعداد وقائد إظهار متعدد الأرقام، وكمثال على ذلك الدارة المتكاملة ICM7217A وهي عبارة عن عداد قابل للبرمجة وقائد إظهار لأربعة أرقام وهذه الدارة من إنتاج شركة Intersil. تستخدم هذه الدارة في تطبيقات عديدة، وتؤمن مخارج لقيادة إظهار سباعي القطع من النوع multiplexed LED display ذي المصعد المشترك.



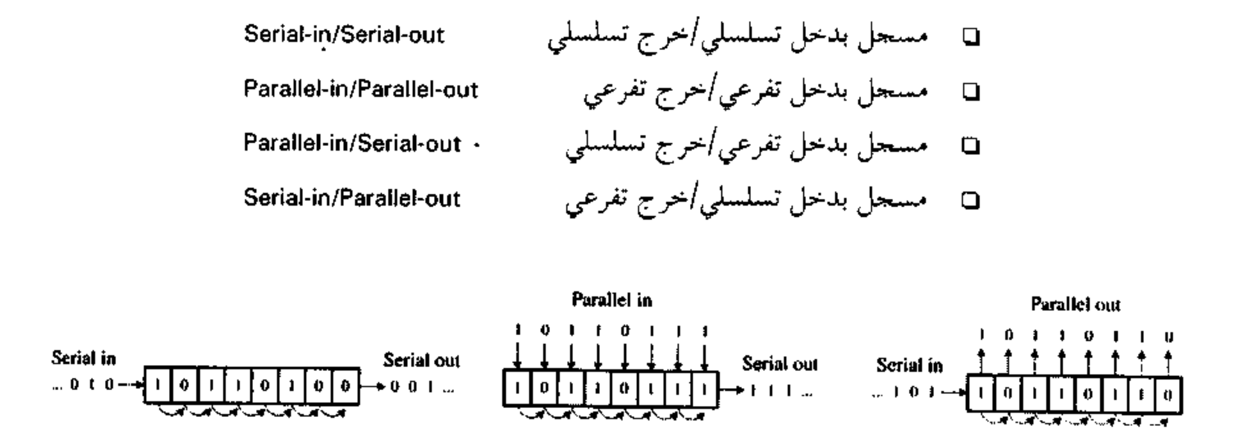
الشكل (114.12): الدارة المتكاملة ICM7217A

في الشكل السابق تجد تطبيقاً بسيطاً للدارة المتكاملة ICM7217A كعداد أربع خانات. وإذا كنت مهتماً بمعرفة كيفية عمل العداد مع التعرف على تطبيقات أخرى لهذه الدارة ابحث في نشرات المعطيات لشركة Intersil من موقع الإنترنت www.intersil.com، فالأفضل في هذه الحالة هو التعلم من الجهة الصانعة. تعرَّف أيضاً على الدارات الأخرى التي تقدمها Intersil كدارات عدادات وقيادة إظهار. توجد جهات صانعة أخرى تقدم دارات متكاملة مشابهة، وعليك البحث على الشبكة عن مواقع هذه الجهات للتعرف على المواصفات والتطبيقات.

8.12 مسجلات الإزاحة

من الضروري أحياناً توقيف المعطيات التي تنتقل في النظام الرقمي من أجل نسخها، كما يكون من الضروري أحياناً إزاحة المعطيات إلى اليمين أو اليسار. ويسمى العنصر الذي يحقق ذلك باسم مسجل إزاحة (Shift Register). يصمم مسجل الإزاحة من صف من القلابات التي توصل مع بعضها بحيث تزاح المعطيات إما باتجاه اليمين أو اليسار. تستطيع أغلب مسجلات الإزاحة التعامل مع إزاحة المعطيات تسلسلياً وتفرعيا، ويمكن استخدامها للتحويل من تسلسلي إلى تفرعي ومن تفرعي إلى تسلسلي ويبيّن الشكل (115.12) الأنواع الثلاثة من مسجلات الإزاحة وهي:

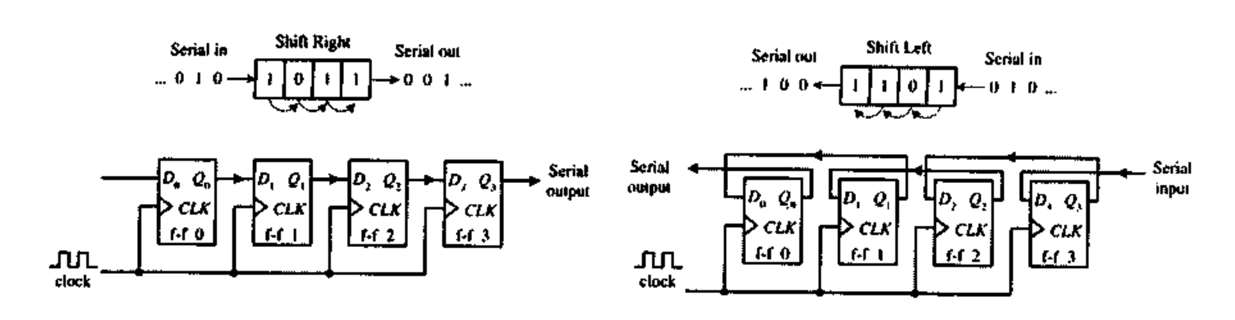
- مسجل بدخل تسلسلي/خرج تسلسلي Serial-in/Serial-out
- مسجل بدخل تفرعي/خرج تفرعي Parallel-in/Parallel-out
- مسجل بدخل تفرعي/خرج تسلسلي Parallel-in/Serial-out
- مسجل بدخل تسلسلي/خرج تفرعي Serial-in/Parallel-out



الشكل (115.12): مخططات صندوقية لبعض أنواع مسجلات الإزاحة.

1.8.12 مسجلات الإزاحة بدخل تسلسلي/خرج تسلسلي

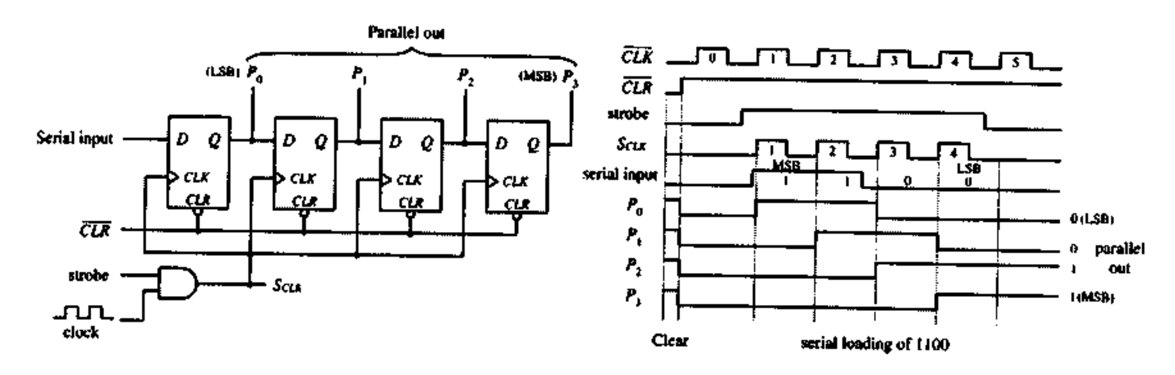
يبيّن الشكل (116.12) مسجل إزاحة 4-bit بدخل تسلسلي وخرج تسلسلي مكوناً من أربعة قلابات نوع D. تطبق المعطيات التسلسليّة على مدخل المعطيات (D) للقلاب رقم (0)، وعند ورود الجبهة الصاعدة لنبضة Clock فإن المعطيات التسلسلية تُزاح خانة واحدة من اليسار إلى اليمين، من القلاب (0) إلى القلاب (1) ومهما كانت المعطيات الموجودة على مداخل القلابات (2)، (3) و(4) فإنها تزاح إلى اليمين خلال أول نبضة Clock. إن تخزين (4) خانات في هذا المسجل يتطلب (4) نبضات Clock. تبيّن الدارة اليمينية كيفية توصيل القلابات لتشكيل مسجل إزاحة من اليمين إلى اليسار. يمكن تشكيل مسجل إزاحة لعدد أكبر من الخانات بزيادة عدد القلابات التي توصل مع بعضها (يحتاج مسجل إزاحة لـ 8 خانات إلى ثمانية قلابات).



الشكل (116.12): دارات مسجلات إزاحة بدخل تسلسلي وخرج تسلسلي.

2.8.12 مسجلات إزاحة بدخل تسلسلي وخرج تفرعي

يظهر في الشكل (117.12) مخطط لمسجل إزاحة 4-bit بدخل تسلسلي وخرج تفرعي، وهذه الدارة هي نفس دارة المسجل السابق (دخل تسلسلي ـــ وخرج تسلسلي) ولكن الخرج هنا يؤخذ من مخارج القلابات كما هو واضح في الشكل. يمكن تصفير كافة مخارج المسجل بواسطة مدخل التصفير $\overline{CLR}$ الفعال في حالة Low أما مدخل التبويب (Strobe) فإنه يعمل كمتحكم بتمكين Clock. يبيِّن المخطط النبضي تتابع الإزاحة التسلسلية وتحويل المعطيات إلى تفرعية.

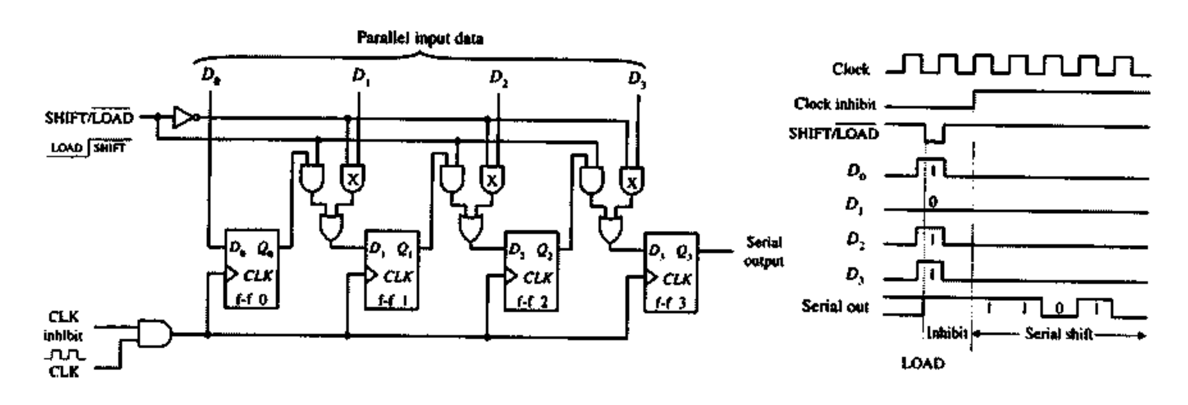


الشكل (117.12) مسجل إزاحة بدخل تسلسلي - وخرج تفرعي.

3.8.12 مسجلات الإزاحة بدخل تفرعي، وخرج تسلسلي

يحتاج تصميم مسجل إزاحة 4-bit بدخل تفرعي وخرجٍ تسلسلي إلى بعض البوابات المنطقية الإضافية كما في الشكل (118.12) فالمعطيات التفرعية يجب أن يتم تحميلها أولاً إلى مداخل معطيات القلابات، ومن أجل تحميل المعطيات يوضع المدخل $SHIFT/\overline{LOAD}$ في حالة Low.

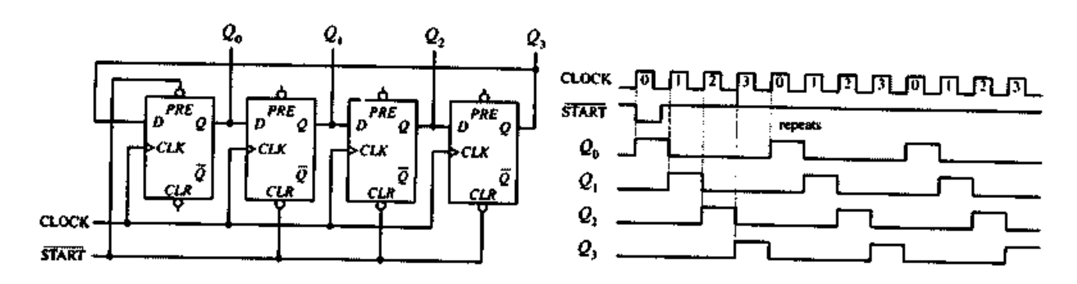
وهذا يمكِّن بوابات AND المشار إليها بالعلاقة (X) وتدخل بذلك كلمة الدخل المكونة من 4-bit إلى مداخل القلابات D_0 - D_3 وعند تطبيق نبضة Clock خلال نمط التحميل فإن الكلمة 4-bit word تمسك في القلابات وتظهر على المخارج Q_0 حتى Q_3. لإزاحة الكلمة يوضع المدخل $SHIFT/\overline{LOAD}$ في حالة high وبذلك يتم تمكين كافة بوابات AND غير المعلمة بإشارة (X) وتنتقل خانة المعطيات الموجودة في خرج كل قلاب إلى مدخل القلاب الذي يليه إلى اليمين، ونحتاج هنا إلى أربع نبضات Clock لإزاحة الكلمة التفرعية (Parallel word) وإخراجها من المخرج التسلسلي.



الشكل (118.12): دارة مسجل إزاحة 4-bit (دخل تفرعي - خرج تسلسلي).

4.8.12 عداد حلقي

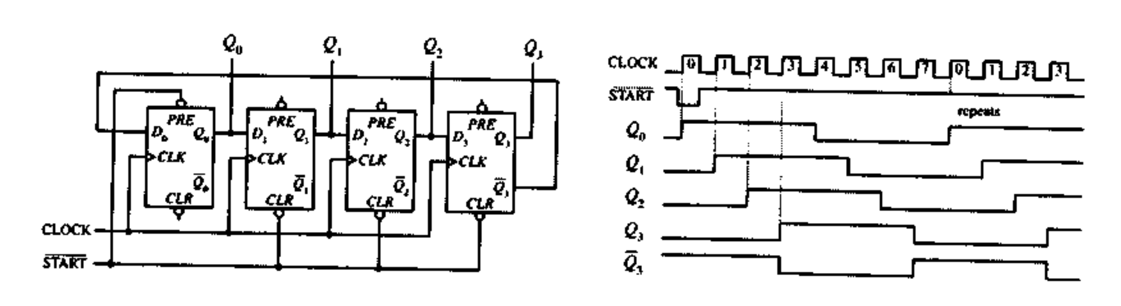
إن العداد الحلقي والذي يسمى أيضاً (shift register sequencer) هو نوع فريد من مسجلات الإزاحة ويحوي تغذية عكسية من خرج آخر قلاب إلى دخل أول قلاب. يبيِّن الشكل (119.12) دارة عداد حلقي 4-bit مكون من قلابات D. عند وضع مدخل $\overline{START}$ على حالة Low تنتقل $\overline{Q_0}$ إلى حالة high لأن مدخل preset فعال في حالة Low، أما المخارج Q_1، Q_2 وQ_3 فتبقى في حالة Low (تُصفر لأنها موصولة مع $\overline{START}$ الموجودة في حالة Low)، ويتم بذلك تخزين الكلمة (1000) في المسجل. عند انتقال مدخل $\overline{START}$ إلى حالة Low فإن خانات المعطيات المخزنة في القلاب تزاح إلى اليمين مع كل جبهة موجبة لنبضة Clock وتُرسل خانة المعطيات لخرج آخر قلاب إلى مدخل المعطيات لدخل أول قلاب وتستمر دورة الإزاحة هذه بالدوران في الدارة طيلة فترة تطبيق نبضات Clock. يمكن البدء بدورة إزاحة جديدة بنقل مدخل $\overline{START}$ إلى حالة Low.



الشكل (119.12): عداد حلقي.

5.8.12 عداد إزاحة جونسون

يشبه عداد إزاحة جونسون العداد الحلقي ولكن التغذية العكسيَّة فيه تعود من الخرج المعكوس ($\overline{Q}$) لآخر قلاب إلى مدخل المعطيات لأول قلاب. يبيِّن الشكل (120.12) دارة عداد جونسون 4-bit، ويبدأ عمل هذا العداد بوضع المدخل $\overline{START}$ في حالة Low فيتم وضع الخرج Q_0 قسرياً في حالة high أما باقي المخارج Q_1، Q_2 وQ_3 فتبقى في حالة Low، وتكون $\overline{Q_3}$ في حالة high. إذن يتم تحميل المسجل بالكلمة الثنائية (1000)، وعند وضع المدخل $\overline{START}$ في حالة Low تُزاح المعطيات عبر المسجل وتكون الخانة الأخيرة التي ترسل عكسياً إلى مدخل المعطيات للقلاب الأول هي (1)، ومع الجبهة التالية لنبضة Clock يُطبق (1) آخر على المدخل D_0 وفقط مع جبهة نبضة Clock الرابعة يتم إعادة (0) من ($\overline{Q_3}$) إلى المدخل (D_0) وذلك عندما يكون الـ (1) قد أُزيح إلى آخرقلاب، وعندها يكون مسجل الإزاحة قد امتلأ بواحدات (1s). بتطبيق نبضات Clock إضافية يتم تطبيق (0) على المدخل D_0 لأربع نبضات Clock وتكون في نهايتها مخارج كافة القلابات أصفاراً فيعود $\overline{Q_3}$ إلى (1) ويُطبق (1) إلى D_0 مع نبضة Clock التالية وتتكرر الدورة، تحتاج دورة عداد جونسون إلى 8 نبضات وليس إلى (4) نبضات كما في العداد الحلقي.



الشكل (120.12): عداد إزاحة جونسون.

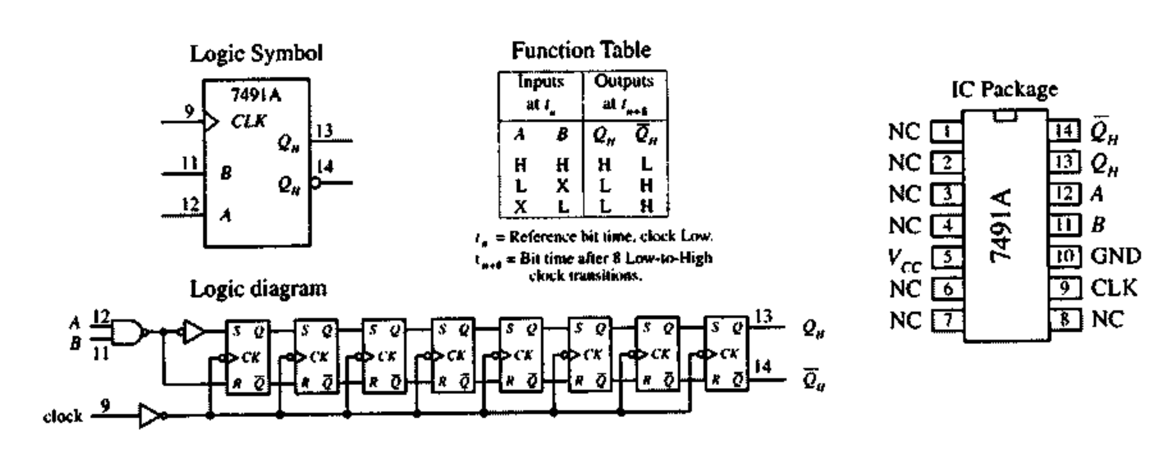
6.8.12 الدارات المتكاملة لمسجلات الإزاحة

تمت في الفقرات السابقة تغطية المبدأ النظري الأساسي لعمل مسجلات الإزاحة، وسنتعرف الآن على الدارات المتكاملة ICs لمسجلات الإزاحة التي تحوي بداخلها كافة الدارات المنطقية الضروريَّة.

الدارة 7491A دارة مسجل إزاحة 8-bit دخل تسلسلي، خرج تسلسلي

الدارة 7491A هي عبارة عن مسجل إزاحة 8-bit بدخل تسلسلي وخرج تسلسلي وتتكون من ثمانية قلابات SR موصولة داخلياً.

لهذه الدارة مدخلا معطيات A وB وهذه المداخل موصولة داخلياً إلى مداخل بوابة NAND كما في الشكل، وهذا يعني أنه من أجل إزاحة الـــ (1) الثنائي يجب أن يكون كلا الدخلين على حالة (1) ولإزاحة (0) يكفي أن يكون أحد المدخلين (0). تعمل الدارة على الجبهات الصاعدة لنبضات Clock، وتزاح المعطيات إلى اليمين مع كل جبهة لنبضة Clock.

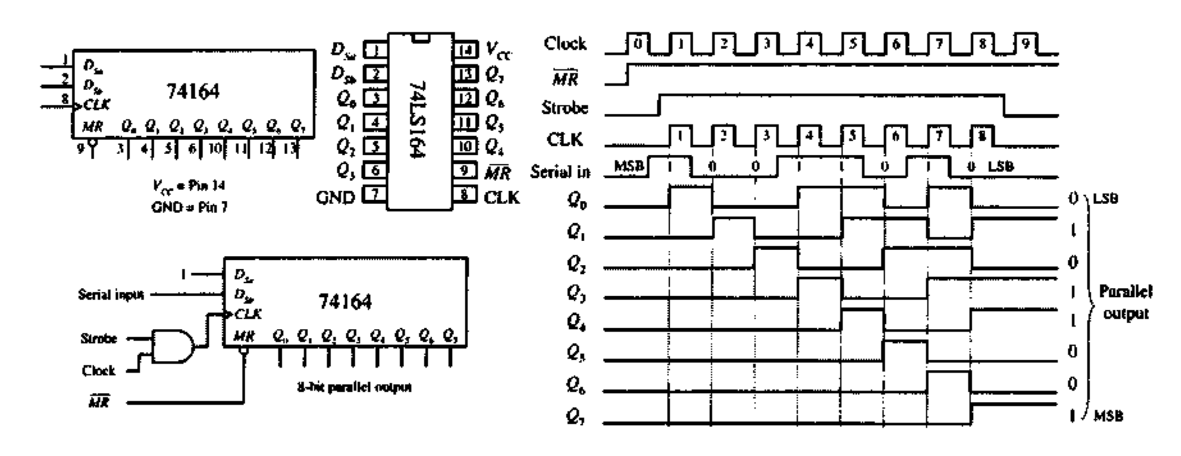


الشكل (121.12): الدارة المتكاملة 7491A.

74164 دارة متكاملة لمسجل إزاحة 8-bit دخل تسلسلي، خرج تفرعي

هذه الدارة المتكاملة (74164) هي مسجل إزاحة 8-bit بدخل تسلسلي وخرج تفرعي وللدارة مدخلان تسلسليان D_{sa} وD_{sb} موصولان داخلياً إلى بوابة منطقية، وكما في الدارة 7491A يعمل أحد هذه المداخل التسلسلية كمدخل تمكين للمعطيات المراد إزاحتها، فمثلاً إذا اعتبرنا أن D_{sa} هو مدخل المعطيات التسلسلي فإن D_{sb} يجب أن يكون (1) كي يتم إدخال المعطيات إلى المسجل، أما إذا وضع على حالة (0) فإنه يمنع المعطيات من الدخول إلى المسجل.

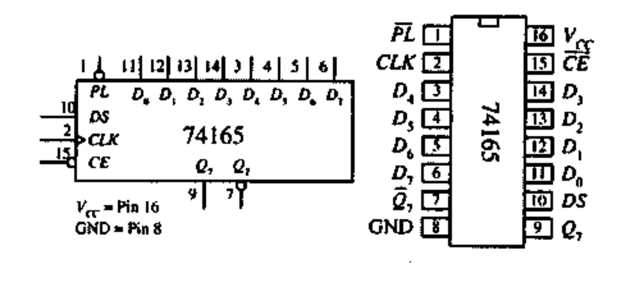
تُزاح المعطيات المطبقة على المدخل التسلسلي مع الجبهة الصاعدة لكل نبضة Clock وتصل خانة المعطيات التي تم إدخالها إلى المسجل أولاً إلى آخر خرج تفرعي (Q_7) بعد ثمانية نبضات Clock. يستخدم مدخل التصفير الأساسي $\overline{MR}$ لتصفير كافة مخارج المسجل وذلك عند وضعه في حالة Low. المخطط النبضي المبيَّن في الشكل يوضح إدخال كلمة معطيات 154_{10} (10011010) تسلسلياً وتحويلها إلى كلمة تفرعية (parallel word)، ودارة الإزاحة المستخدمة مبينة في أسفل الشكل وفيها نلاحظ وجود مدخل (Strobe) لتمكين Clock. عندما يكون مدخل Strobe في حالة high تمكن نبضات Clock.



الشكل (122.12): الدارة المتكاملة 74164.

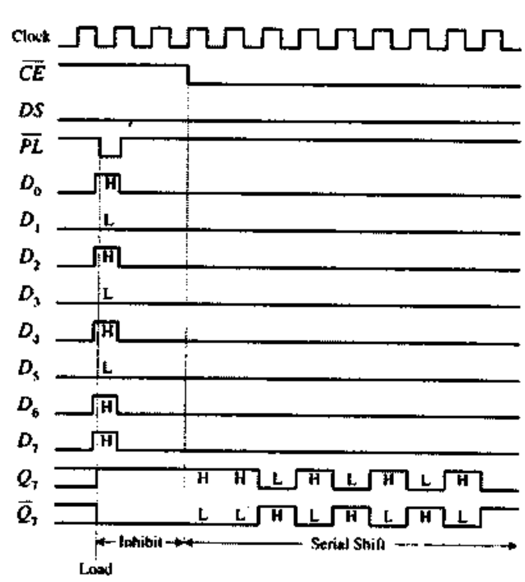
الدارة المتكاملة 74165 مسجل إزاحة 8-bit بدخل تسلسلي أو تفرعي وخرج تسلسلي

تعمل هذه الدارة الفريدة (74165) كمسجل إزاحة 8-bit بدخل إما تسلسلي أو تفرعي وخرج تسلسلي. عند استخدام الدارة كمسجل إزاحة بدخل تفرعي تطبق المعطيات على المداخل D_0 ـــ حتى D_7 وتحمل إلى المسجل بتطبيق نبضة Low على المدخل ($\overline{PL}$) ويجب تطبيق Low على مدخل تمكين Clock للبدء بإزاحة المطعيات وإخراجها من الخرج التسلسلي (Q_7)، وإذا أردت عكس الخرج فيمكنك أخذ الخرج من $\overline{Q_7}$، وبتمكين نبضات Clock تصل النبضات إلى القلابات D الموجودة داخل الدارة المتكاملة. تعمل الدارة إذا كان الدخل تفرعياً ـــ والخرج تسلسلياً كمسجل تفرعي الدخل تسلسلي الخرج، أما عندما تكون معطيات الدخل تسلسلية فإنها تطبق على المدخل D_S. يبيِّن المخطط النبضي عينة من معطيات تفرعية وكيفية إزاحتها وإخراجها تسلسلياً بدءاً من لحظة تفعيل $\overline{CE}$ وذلك بعد تحميل هذه المعطيات بتطبيق نبضة Low على $\overline{PL}$.



Operating Modes	Inputs					Q_n Register		Outputs	
	$\overline{PL}$	$\overline{CE}$	CLK	DS	D_0 - D_7	Q_0	Q_1 - Q_6	Q_7	$\overline{Q}_7$
Parallel load	L	X	X	X	L	L	L - L	L	H
	L	X	X	X	H	H	H - H	H	L
Serial shift	H	L	↑	l	X	L	q_0 - q_5	q_6	$\overline{q}_6$
	H	L	↑	h	X	H	q_0 - q_5	q_6	$\overline{q}_6$
Hold ("do nothing")	H	H	X	X	X	q_0	q_1 - q_6	q_7	$\overline{q}_7$

H = High voltage level; h = High voltage level one setup time prior to the low-to-high clock transition; L = Low voltage level; l = Low voltage level one setup time prior to the low-to-high clock transiton; q_n = Lower case letters indicate the state of the referenced output one setup time prior to the low-to-high clock transition; X = Don't care; ↑ = Low-to-high clock transition.



الشكل (123.12): الدارة المتكاملة 74165.

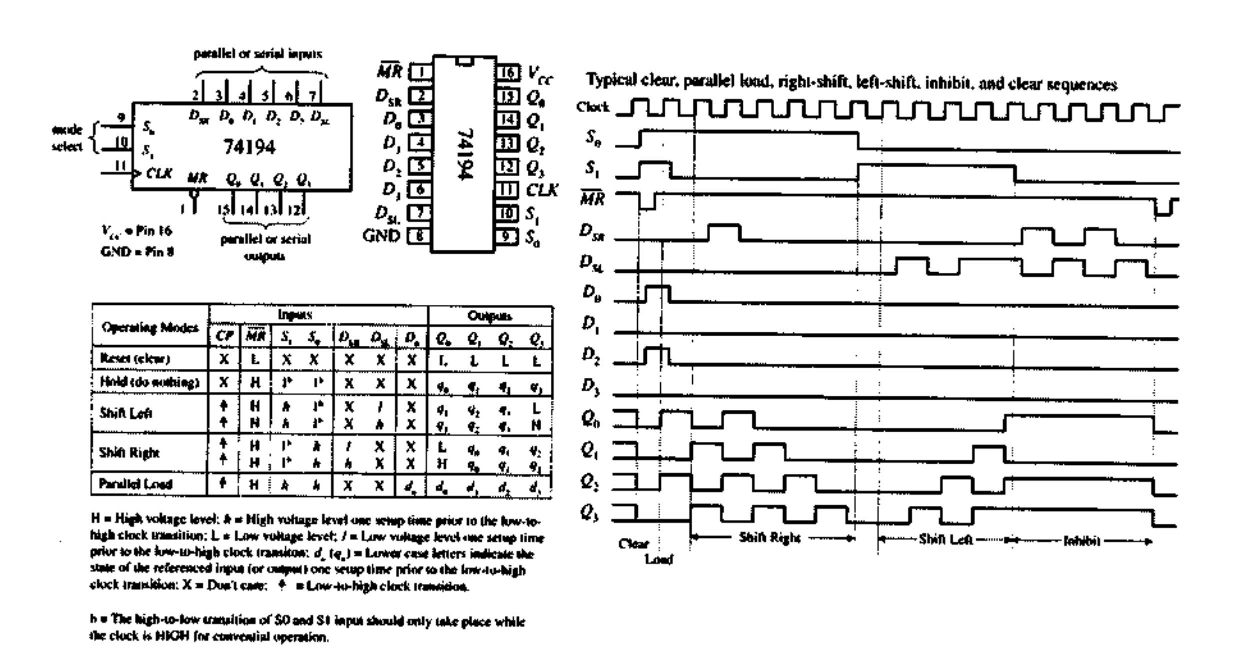
الدارة المتكاملة 74194 مسجل إزاحة عمومي

يبيِّن الشكل (124.12) الدارة المتكاملة 74194، وهي عبارة عن مسجل إزاحة 4-bit عمومي ويمكن أن يكون الدخل في هذه الدارة تسلسلياً أو تفرعياً وكذلك يمكن أن يؤخذ الخرج تسلسلياً أو تفرعياً. هذا بالإضافة إلى إمكانية الإزاحة بالاتجاهين، إلى اليمين أو اليسار وفقاً لإشارات الدخل المطبقة على مداخل التحكم بالانتقاء S_1، S_0. يمكن تطبيق المعطيات التسلسلية إما على دخل الإزاحة اليميني (D_{SR}) أو على دخل الإزاحة اليساري (D_{SL}). لمداخل التحكم بالانتقاء أربع حالات منطقية هي:

(S_0 = Low ; S_1 = Low): وهذه الحالة تسمى حالة hold.

(S_0 = high ; S_1 = high): وهذه حالة التحميل التفرعي.

وطبعاً يجب تطبيق نبضة Clock لإزاحة المعطيات أو تحميلها. عند العمل في النمط التفرعي (S_0 = S_1 = high) يتم إدخال المعطيات عبر المداخل D_0 وحتى D_3 وتنتقل هذه المعطيات إلى المخارج Q_0 حتى Q_3 مع الجبهة الصاعدة لنبضة Clock التالية. يوجد في الدارة 74194 مدخل إرجاع غير متزامن $\overline{MR}$ وعند تطبيق نبضة Low على هذا المدخل تصبح كافة المخارج Q في حالة (Low). يمكن وصل الخرج Q_3 مع الدخل D_{SR} للحصول على مسجل إزاحة يميني دوار وطبعاً يجب أن يكون (S_0 = high, S_1 = Low)، ويمكن أيضاً تشكيل مسجل إزاحة يساري دوار بوصل Q_0 مع الدخل D_{SL} ووضع S_0 = Low ; S_1 = high. يبيِّن المخطط النبضي تحميل معطيات تفرعية وتتالي عمليات الإزاحة.



Operating Modes	CP	$\overline{MR}$	S_1	S_0	D_{SR}	D_{SL}	D_n	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3
Reset (clear)	X	L	X	X	X	X	X	L	L	L	L
Hold (do nothing)	X	H	l*	l*	X	X	X	q_0	q_1	q_2	q_3
Shift Left	↑	H	h	l*	X	l	X	q_1	q_2	q_3	L
	↑	H	h	l*	X	h	X	q_1	q_2	q_3	H
Shift Right	↑	H	l*	h	l	X	X	L	q_0	q_1	q_2
	↑	H	l*	h	h	X	X	H	q_0	q_1	q_2
Parallel Load	↑	H	h	h	X	X	d_n	d_0	d_1	d_2	d_3

H = High voltage level; h = High voltage level one setup time prior to the low-to-high clock transition; L = Low voltage level; l = Low voltage level one setup time prior to the low-to-high clock transition; d_n (q_n) = Lower case letters indicate the state of the referenced input (or output) one setup time prior to the low-to-high clock transition; X = Don't care; ↑ = Low-to-high clock transition.

h = The high-to-low transition of S0 and S1 input should only take place while the clock is HIGH for convential operation.

الشكل (124.12): مسجل الإزاحة العمومي 74194.

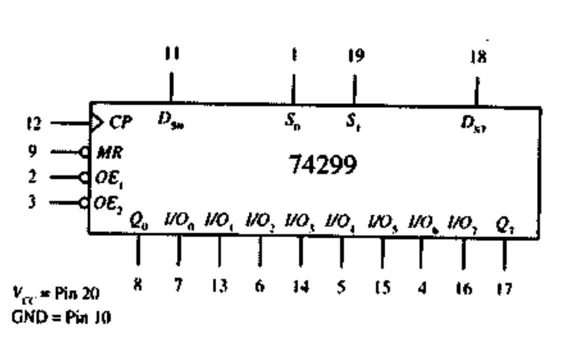
الدارة المتكاملة 74299 مسجل إزاحة/تخزين (8-bit) عمومي بدارة خرج ثلاثية الحالة

يوجد عدد من مسجلات الإزاحة ذات مخارج ثلاثية الحالة (يمكن أن يكون الخرج فعالاً في حالة high أو Low أو في حالة ممانعة عالية ويمكن اعتباره في هذه الحالة دارة مفتوحة أو عائماً). تستخدم هذه المسجلات عادة كمسجلات تخزين (Storage Registers) في تطبيقات الربط مع الممرات (buses)، والدارة المتكاملة 742999 هي مثال على ذلك.

وهذه الدارة مبينة في الشكل (125.12) ولها أربعة أنماط عمل متزامنة. يتم انتخاب أحد هذه الأنماط عبر مداخل الانتخاب S_0، S_1 وأنماط العمل الأربعة هي الإزاحة إلى اليمين، الإزاحة إلى اليسار، المسك holding والتحميل التفرعي (انظر إلى

جدول الوظيفة في الشكل (125.12). كافة مداخل الدارة، ومداخل المعطيات التسلسلية D_{S0} وD_{S7} ومداخل المعطيات التفرعية I/O_0 وحتى I/O_7 تقدح كلها على الجبهات الصاعدة (الموجبة). يُصفر مدخل الإرجاع الأساسي غير المتزامن $\overline{MR}$ المسجل عند تطبيق نبضة Low عليه. للمنفذ I/O ثنائي الاتجاه ــ ثلاثي الحالة ثلاثة أنماط عمل هي:

قراءة المسجل (read register)، تحميل المسجل (Load Register)، وإلغاء تفعيل المنفذ I/O (I/O disable). يسمح نمط قراءة المسجل للمعطيات بأن تكون موجودة ومتاحة على المخارج I/O ويتم اختيار هذا النمط بوضع مداخل تمكين الخرج $\overline{OE_1}$ و $\overline{OE_2}$ في حالة Low وبجعل أحد مداخل الانتخاب (Select Inputs) أو كليهما في حالة Low. يُعد نمط تحميل المسجل الدارة المتكاملة للتحميل التفرعي للمعطيات خلال الانتقال من Low إلى high لنبضة clock التالية، ويتم انتقاء هذا النمط بوضع مدخلي انتخاب الدخل على حالة high. أخيراً يعمل نمط إلغاء تفعيل المنفذ (I/O) على إلغاء تفعيل المخارج (توضع المخارج في حالة ممانعة عالية) وذلك عند تطبيق high على واحد على الأقل (أو على الاثنين معاً) من مداخل تمكين الخرج. وبذلك يعزل المسجل بشكلٍ فعال عن الممر الموصول معه.



H = High voltage level; h = High voltage level one setup time prior to the low-to-high clock transition; L = Low voltage level; l = Low voltage level one setup time prior to the low-to-high clock transiton; q_n = Lowercase letters indicate the state of the referenced output one setup time prior to the low-to-high clock transition; X = Don't care; ↑ = Low-to-high clock transition.

Operating Modes	Inputs							Outputs		
	MR	CP	S_0	S_1	D_{S0}	D_{S7}	I/O_n	Q_0	$Q_1 - Q_6$	Q_7
Reset (clear)	L	H	X	X	X	X	X	L	L - L	L
Shift right	H	↑	h	l	l	X	X	L	$q_0 - q_5$	q_6
	H	↑	h	l	h	X	X	H	$q_0 - q_5$	q_6
Shift left	H	↑	l	h	X	l	X	q_1	$q_0 - q_5$	L
	H	↑	l	h	X	h	X	q_1	$q_0 - q_5$	H
Hold ("do nothing")	H	↑	l	l	X	X	X	q_0	$q_1 - q_6$	q_7
Parallel load	H	↑	h	h	X	X	l	L	L - L	L
	H	↑	h	h	X	X	h	H	H - H	H

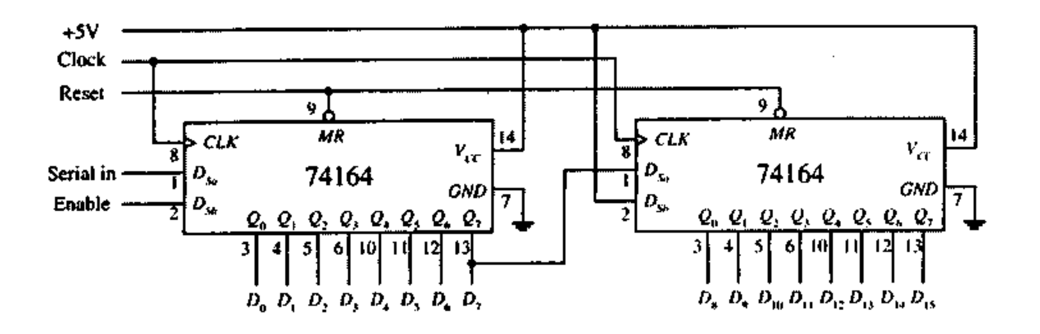
3-state I/O port operating mode	Inputs					Inputs/Outputs
	$\overline{OE}_1$	$\overline{OE}_2$	S_0	S_1	Q_n (register)	$I/O_0 - I/O_7$
Read register	L	L	L	X	L	L
	L	L	L	X	H	H
	L	L	X	L	L	L
	L	L	X	L	H	H
Load register	X	X	H	H	$Q_n = I/O_n$	I/O_n = inputs
Disable I/O	H	X	X	X	X	High Z
	X	H	X	X	X	High Z

الشكل (125.12): الدارة المتكاملة 74299.

7.8.12 تطبيقات بسيطة لمسجلات الإزاحة

مبدل 16-Bit من تسلسلي إلى تفرعي

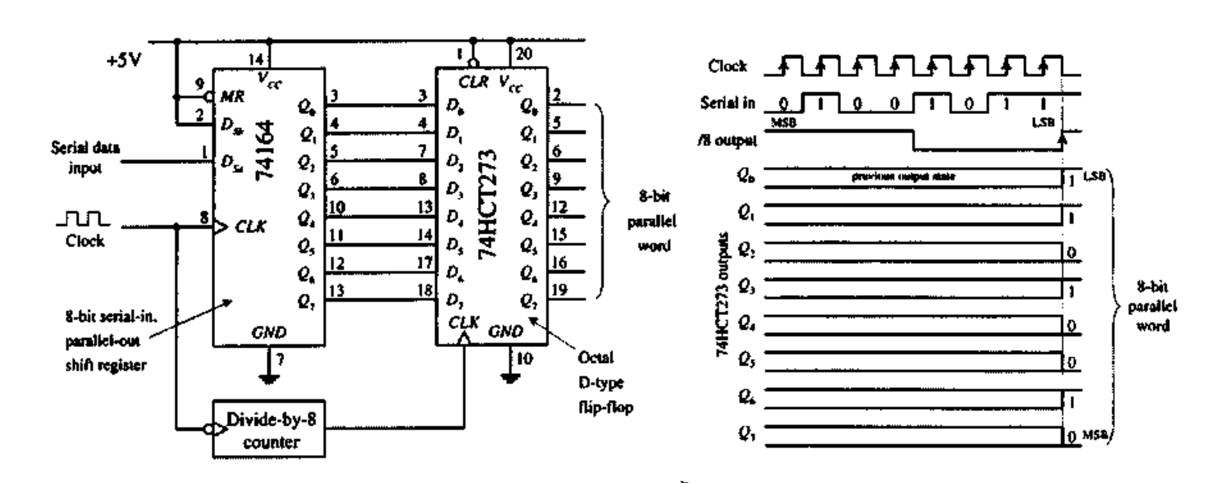
يمكن ببساطة تشكيل مبدل 16-bit من تسلسلي إلى تفرعي بوصل دارتي 74164 مبدل 8-bit من تسلسلي إلى تفرعي مع بعضهما كما في الشكل (126.12) ويتم ذلك بوصل الخرج Q_7 من المسجل الأول إلى أحد المداخل التسلسسلية في المسجل الثاني (تذكر أن المدخل التسلسلي غير المستخدم كمدخل معطيات تسلسلية يعمل كمدخل تمكين فعال في حالة high للدخل التسلسلي الآخر)، وفي الشكل تم اختيار D_{Sa} كمدخل للمعطيات في المسجل الثاني. عندما تزاح المعطيات خارجة من Q_7 للمسجل الأول (أو من مخرج المعطيات D_7) فإنها تدخل إلى المدخل التسلسلي للمسجل الثاني وتظهر على خرجه Q_0 (أو مخرج المعطيات D_8). تحتاج خانة معطيات دخل إلى (16) نبضة Clock كي تصل إلى Q_7 من المسجل الثاني (أو D_{15}).



الشكل (126.12): مسجل إزاحة 16-bit بدخل تسلسلي، وخرج تفرعي.

مبدّل تسلسلي إلى تفرعي 8-bit مع نقل معطيات متزامن

يبيِّن الشكل (127.12) دارة تعمل كمبدِّل تسلسلي ــ إلى ــ تفرعي وتظهر هذه الدارة الكلمة 8-bit المحوَّلة إلى الشكل التفرعي على مخارجها فقط بعد أن يكون قد اكتمل إدخال الخانات الثمانية إلى المسجل. تستخدم الدارة المتكاملة 74164 لهذا الغرض، وهي عبارة عن دارة مسجل إزاحة 8-bit بدخل تسلسلي وخرج تفرعي، بالإضافة إلى الدارة المتكاملة 74HCT273 التي تحوي بداخلها ثمانية قلابات نوع D كما يستخدم أيضاً عداد مقسم على (8). تحمَّل المعطيات التسلسلية مع كل جبهة صاعدة لنبضات Clock إلى الدارة 74164 وبعد ثمانية نبضات Clock تكون الخانة التسلسلية التي أُدخلت قد أزيحت إلى Q_7 من الدارة 74164 أما آخر خانة تسلسلية تم إدخالها فتظهر على Q_0 لنفس الدارة ومع الجبهة الهابطة لثامن نبضة Clock ينتقل خرج العداد المقسم على (8) والذي يقدح على الجبهة الهابطة إلى حالة high وعند هذا الانتقال لخرج العداد فإن المعطيات الموجودة على مداخل قلابات D للدارة المتكاملة 74HCT273 (وهي نفس معطيات خرج الدارة 74164) تظهر على مخارج الدارة 74HCT273. يمكن اعتبار الدارة المتكاملة 74HCT273 كمسجل تخزين مؤقت (temporary storage register) يلقي معطياته مرة كل ثماني نبضات Clock.

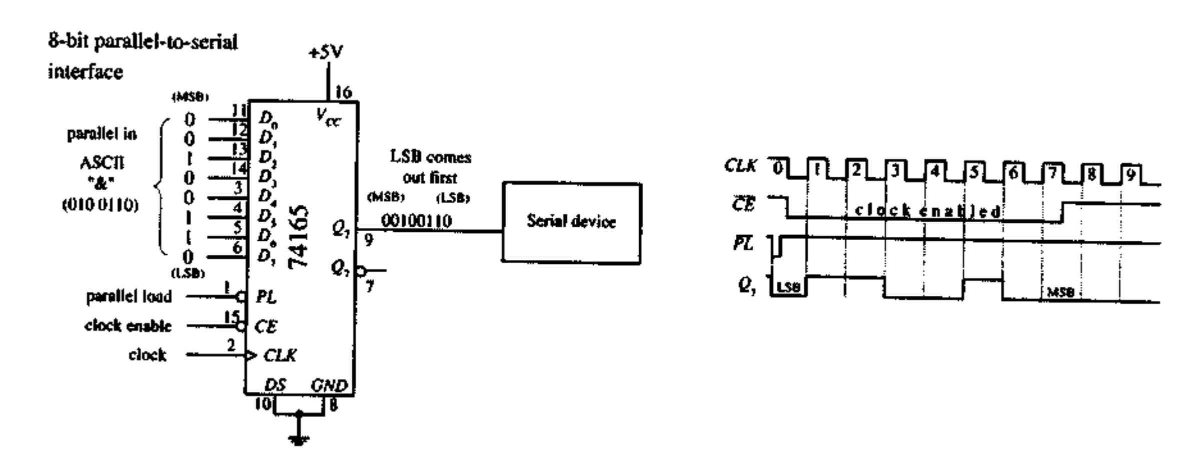


الشكل (127.12): مبدل 8-bit من تسلسلي إلى تفرعي.

دارة ربط 8-bit من تفرعي، إلى تسلسلي

يستخدم في هذه الدارة مسجل الإزاحة 74165 (دخله 8-bit تفرعي وخرجه تسلسلي) لاستقبال كلمة ASCII تفرعية وتحويلها إلى كلمة ASCII تسلسلية ويمكن إرسالها بعد ذلك إلى جهاز تسلسلي.

تذكر أن شيفرة ASCII هي بطول (7) خانات (على سبيل المثال الشيفرة الثنائية بالأسكي ASCII للرمز & هي 0100110) ولذلك فإن كافة الأجهزة التي تتواصل مع بعضها بواسطة شيفرة الـ ASCCII تستخدم بتاً (bit) ثامناً إضافياً لأغراض خاصة، قد تكون خانة تكافؤ أو بتاً بوظيفة خاصة لتكوين مجموعة خاصة من المحارف. غالباً يوضع البت الإضافي في حالة Low ويهمل في الجهاز الذي يستقبله، وسنفرض هنا أن البت الإضافي في حالة Low. توضع D_0 في الشكل (128.12) في حالة Low وتطبق الخانة MSB لشيفرة الـ ASCII على المدخل D_1 أما الخانة LSB فتطبق على الدخل D_7. الآن وقد أصبحت معطيات الـ ASCII مطبقة على المداخل فإن تطبيق نبضة Low على المدخل $\overline{PL}$ يؤدي إلى شحن كلمة الـ ASCII والبت الإضافي إلى المسجل. تمكّن نبضات Clock ($\overline{CE}$) من أجل إزاحة المعطيات وطبعاً توضع $\overline{CE}$ على حالة Low وبعد ثماني نبضات Clock (النبضات من 0 إلى 7) يكون الجهاز التسلسلي قد استقبل خانات المعطيات التسلسلية الثمانية. يمكن أن نحتاج معالجاً صغرياً (microprocessor) أو متحكماً صغرياً (microcontroller) للتحكم بوضعيات المداخل $\overline{CE}$ و $\overline{PL}$ لضمان الاتصال والعمل الصحيح بين الجهاز التسلسلي والمسجل.



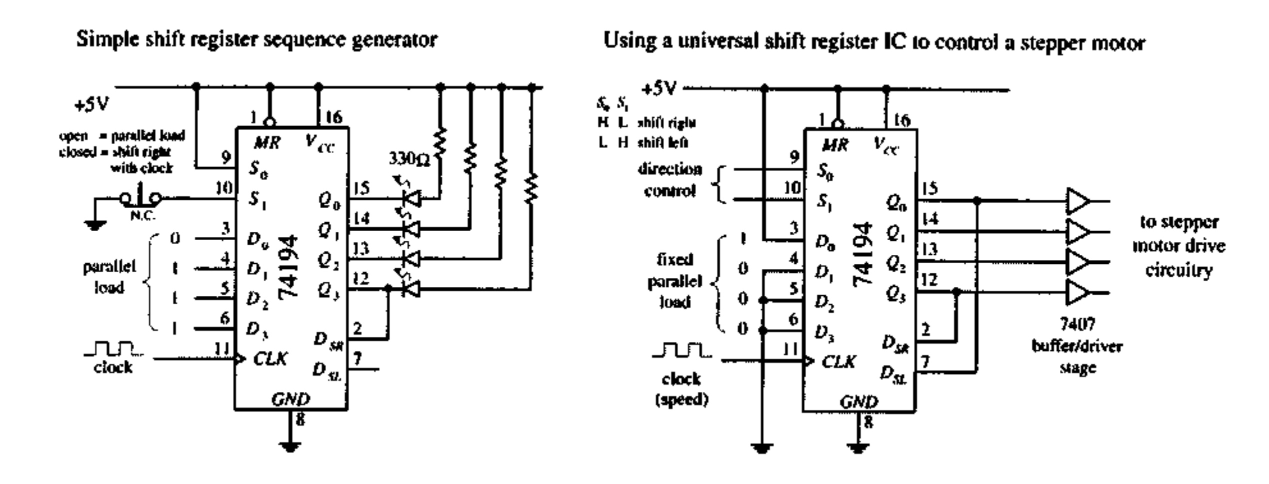
الشكل (128.12): مبدل تفرعي - إلى تسلسلي.

إعادة تدوير مسجلات ذاكرة

مسجل إعادة تدوير الذاكرة هو مسجل إزاحة يُحمَّل مسبقاً بكلمة رقميّة تدور تسلسلياً عبر المسجل عن طريق وصلة تغذية عكسية من الخرج إلى الدخل. تستخدم عملية إعادة تدوير المسجلات لأغراض مختلفة منها تأمين موجة تكرارية محددة لقيادة مداخل دارة متكاملة أو لقيادة دارات قيادة خرج (output drivers) تتحكم بمحرك خطوة.

تطبق على دخل الدارة اليسارية من الشكل (129.12) كلمة تفرعيّة 4-bit (على المداخل D_0 وحتى D_3 لمسجل الإزاحة العمومي 74194).

عندما يكون مدخل الانتقاء (S_1) في حالة high (المفتاح off) يتم تحميل الكلمة 4-bit إلى المسجل وبإغلاق المفتاح (S_1)، S_1 = Low، تزاح الكلمة 4-bit بشكل تسلسلي عبر المسجل وتخرج من (Q_3) وتعود إلى Q_0 عبر المدخل D_{SR} (مدخل الإزاحة التسلسلية اليميني) تماماً مع الجبهة الصاعدة لنبضة Clock. المسجل الموجود في الشكل محمل بـ (0111)، ومع بدء إزاحة الخانات عبر المسجل فإن خرج Low وحيداً سوف ينتقل إلى الأسفل عبر المخارج الموجودة في حالة high ويؤدي ذلك إلى إضاءة الديود المصدر للضوء LED الموصول مع الخرج الذي يكون في حالة Low، وبذلك تكون قد حصلت على دارة بثلاثة ديودات ومَّاضة لشجرة عيد الميلاد!.



الشكل (129.12): مسجلات تدوير معطيات.

إن الدارة اليمينية في الشكل (129.12) تشبه الدارة اليسارية ولكنها مستخدمة لقيادة محرك خطوة. يحوي محرك الخطوة أربعة ملفات للقسم الثابت (Stator) ويجب تغذية هذه الملفات بشكلٍ متعاقب لكي يدور المحرك بزاوية معطاة، فمثلاً لجعل محرك الخطوة يدور باتجاه عقارب الساعة يجب تغذية ملفات الثابت (1)، (2)، (3) و(4) بالتتابع التالي (1000)، (0100)، (0010) و(0001) و(1000). يدور المحرك بعكس عقارب الساعة إذا تمت تغذية الملفات السابقة بالتتابع التالي:

1000، 0001، 0010، 0100، 1000. يمكن ببساطة توليد هذه التتابعات بواسطة الدارة المتكاملة 74194 عن طريق التحميل التفرعي للكلمة (1000) إلى المداخل (D_3 - D_0)، يمكن تدوير المحرك مع عقارب الساعة بإزاحة الخانات إلى اليمين بوضع S_0 = high وS_1 = Low. عند وصول نبضة Clock تصبح الكلمة (1000) الموجودة على المخارج (0100) ثم (0010)، و(0001) وأخيراً (1000). تحدد سرعة دوران المحرك بتردد نبضات Clock. يمكن تحريك المحرك إلى اليسار بوضع S_0 = Low وS_1 = high. من الضروري استخدام دارات عوازل قيادة (buffer/driver) مثل 7407 المبينة في الشكل عند قيادة محركات الخطوة، ولا تكفي عوازل القيادة عملياً ويجب استخدام عدداً من ترانزستورات الخرج، (الترانزستورات غير موجودة في الدارة).

قد تختلف تتابعات التحريك الواردة هنا باختلاف محرك الخطوة. سندرس محركات الخطوة والدارات المختلفة المستخدمة لقيادتها في الفصل الثالث عشر.

9.12 العوازل، الماسكات، والمرسلات المستقبلات ثلاثية الحالة

يتم التشارك من قبل أجهزة ودارات عديدة على ممر مشترك (Common bus) في المنظومات الرقمية التي تستخدم المعالجات الصغرية (وكمثال على ذلك ذواكر RAM، ROM وأجهزة الدخل والخرج). إن ممر المعطيات (data bus) في نظم المعطيات البسيطة عادة ما يكون بثمانية بتات 8-bit، وكي تتشارك الأجهزة على هذا الممر فإن جهازاً واحداً يستطيع إرسال معطيات على هذا الممر في وقت ما، والمعالج هو الذي يحدد الجهاز الموصول فعلياً مع الممر (أي الذي يعطى إمكانية الولوج إلى الممر)، والأجهزة الممنوعة من الولوج إلى الممر، وكي يتمكن المعالج من التحكم بتدفق المعطيات فإنه يحتاج لمساعدة من مسجل خارجي. يتلقى المسجل إشارات التحكم المكونة بواسطة المعالج ويستجيب إما بالسماح للمعطيات التفرعية بالمرور أو بمنع مرور هذه المعطيات. توجد ثلاث أدوات أساسية تستخدم لهذه الغاية وهي العازل الثماني ثلاثي الحالة (octal three-state buffer)، والقلاب الماسك الثماني (octal/latch/flip-flop) والمرسل المستقبل (transceiver).

1.9.12 العوازل الثمانية ثلاثية الحالة

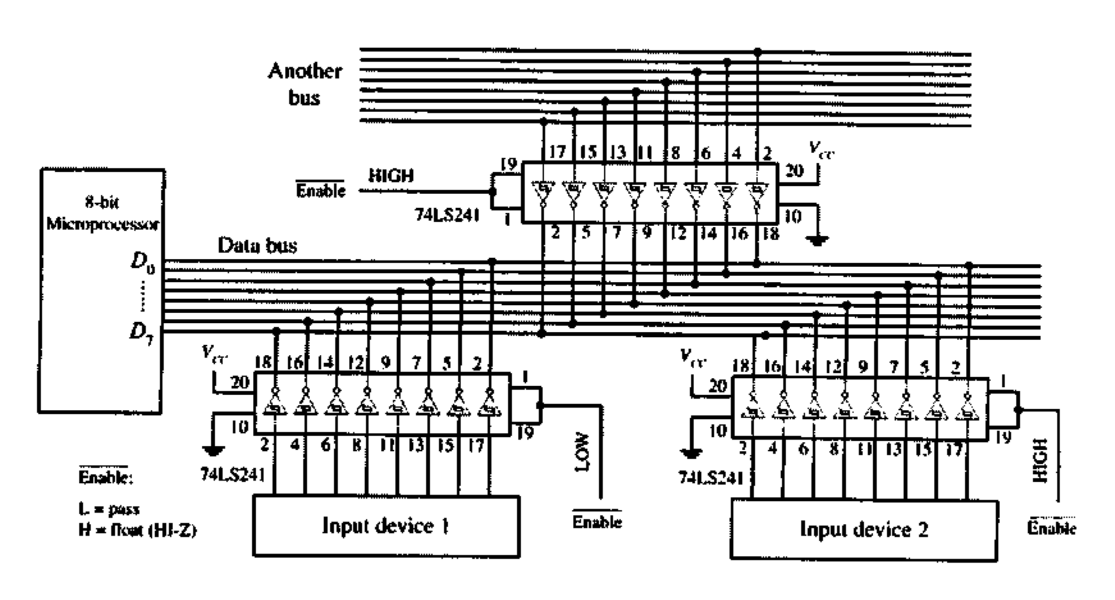
العازل الثماني ثلاثي الحالة هو أداة تسمح عند تمكينها بمرور المعطيات من مداخلها الثمانية إلى مخارجها دون أي تغيير، وعند عدم تمكينها فإن المعطيات تمنع من الوصول إلى المخارج ـــ وتكون المخارج في هذ الحالة في حالة ممانعة عالية (high impedance state)، وهذه الممانعة العالية تجعل التشارك على الممر ممكناً بين أجهزة متعددة. يمكن للعازل أن يؤمن إصدار أو امتصاص تيارات إضافية لقيادة أجهزة الخرج.

يبيِّن الشكل ثلاثة عوازل ثمانية ـــ ثلاثية الحالة شائعة الاستخدام وهذه العوازل هي:

- العازل 74XX240، عازل عاكس ثلاثي الحالة.
- العازل 74XX241، عازل عاكس شميت ـــ ثلاثي الحالة.
- العازل 74244، عازل تقليدي ثلاثي الحالة.

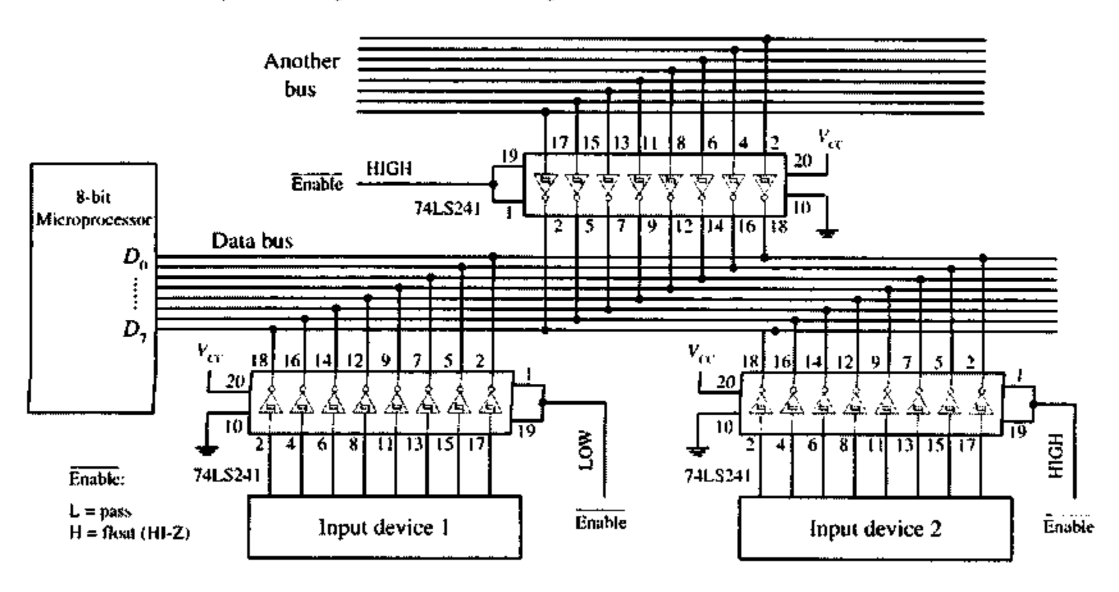
تحوي كل واحدة من هذه الدارات المتكاملة بداخلها على ثمانية عوازل لذلك تسمى عوازل ثمانية (Ocatal) ويتشابه التمكين (enable) وعدم التمكين (disable) فيها، ومن أجل التمكين (السماح بمرور المعطيات من المداخل I إلى المخارج Y) توضع مداخل تمكين الخرج $\overline{OE_a}$ و $\overline{OE_b}$ في حالة Low، أما عند الرغبة بتمكين أربعة مخارج فقط يوضع أحد مخارج التمكين في حالة Low والآخر في حالة high ويمكن من الدارة المتكاملة معرفة المخارج التي يتحكم $\overline{OE_a}$ أو $\overline{OE_b}$ بتمكينها.

إذا وضعت $\overline{OE_a}$ و $\overline{OE_b}$ معاً في حالة high يلغى تفعيل كافة المخارج، أما إذا كان أحدها Low والآخر high تكون أربعة مخارج ممكّنة وأربعة محجوبة.



الشكل (130.12): دارات متكاملة لعوازل ثمانية ثلاثية الحالة.

يبيِّن الشكل (131.12) مثالاً عن كيفية استخدام العوازل الثمانية ثلاثية الحالة في منظومة معالج صغري 8-bit. يقوم العازل العلوي بوصل ممر (bus) إلى ممر المعطيات الأساسي، أما العوازل السفلية فتقوم بوصل (ربط) أجهزة دخل مع ممر المعطيات الأساسي. يمكن للمعالج الصغري أن يختار العازل المفعّل (يفعل أحد العوازل) وذلك بواسطة البرمجة (programming) وبمساعدة التحكم الإضافي بالممر.



الشكل (131.12): نظام عزل ممر 8-bit باستخدام ثلاثة دارات تكاملية لعوازل ثمانية ثلاثية الحالة.

تمر المعطيات من أحد أجهزة الدخل أو من ممر آخر إلى ممر المعطيات فقط عندما يكون العازل الثماني ثلاثي الحالة المتعلق بالوصل ممكّناً (مدخل التمكين Low). يُسمح فقط لجهاز دخل أو لممر آخر بتمرير المعطيات إلى ممر المعطيات الأساسي في وقت واحد. جهاز الدخل (1) في الشكل (131.12) هو فقط الجهاز المسموح له بتمرير المعطيات إلى ممر المعطيات لأن مدخل تمكينه Low. لاحظ أن المعطيات تعكس عند مرورها في العوازل الثمانية العاكسة.

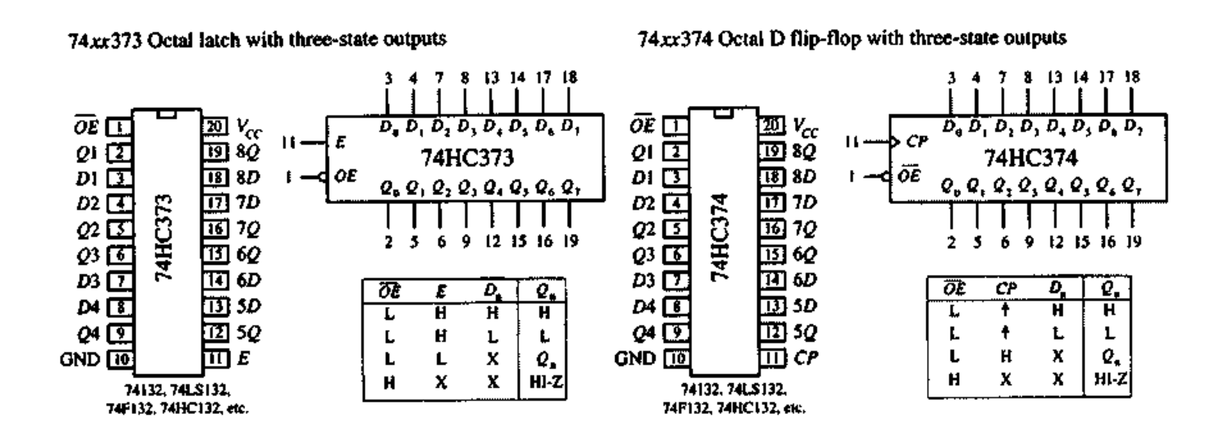
2.9.12 الماسكات الثمانية ثلاثية الحالة والقلابات

يملك الماسك ثلاثي الحالة أو القلاب إمكانية الاحتفاظ (إمساك) بالمعطيات الموجودة على دخله قبل نقل هذه المعطيات إلى خرجه، وتعتبر ميزة الذاكرة هذه هامة جداً في تطبيقات المعالجات، حيث يتشارك عدد من الأجهزة على ممر معطيات مشترك، وذلك لأنها تسمح للمعالج بتخزين المعطيات وتخديم عمليات أخرى تتطلب ممر المعطيات ثم العودة إلى المعلومات المخزونة، كما أن هذه الخاصية تسمح لأجهزة الخرج بأخذ المعطيات الممسوكة من الممر في الوقت الذي تكون فيه هذه المعطيات في حالة تغير. وسنتعرف على الماسك 74XX373 ثلاثي الحالة وعلى القلاب ثلاثي الحالة 74XX374 لفهم كيفية عمل القلابات والماسكات ثلاثية الحالة (انظر الشكل 132.12).

تحوي الدارة المتكاملة 74XX373 على ثمانية ماسكات من نوع D شفافة، وعند تمكين الدارة المتكاملة (وضع high على الدخل E) فإن المعطيات الموجودة على المداخل (D_0 - D_7) تنتقل إلى المخارج (Q_0 - Q_7)، أما عندما تكون E في حالة Low فإن المعطيات المطبقة على الدخل تحمَّل في الماسك. توضع المخارج على حالة ممانعة عالية بتطبيق high على الدخل ($\overline{OE}$).

يبيِّن الشكل (133.12) نظاماً يعمل على ممر معطيات وتستخدم فيه الدارة المتكاملة 74HC373 للتواصل مع جهاز دخل وجهاز خرج. يتم تأمين إشارات التحكم بالعمل من المعالج.

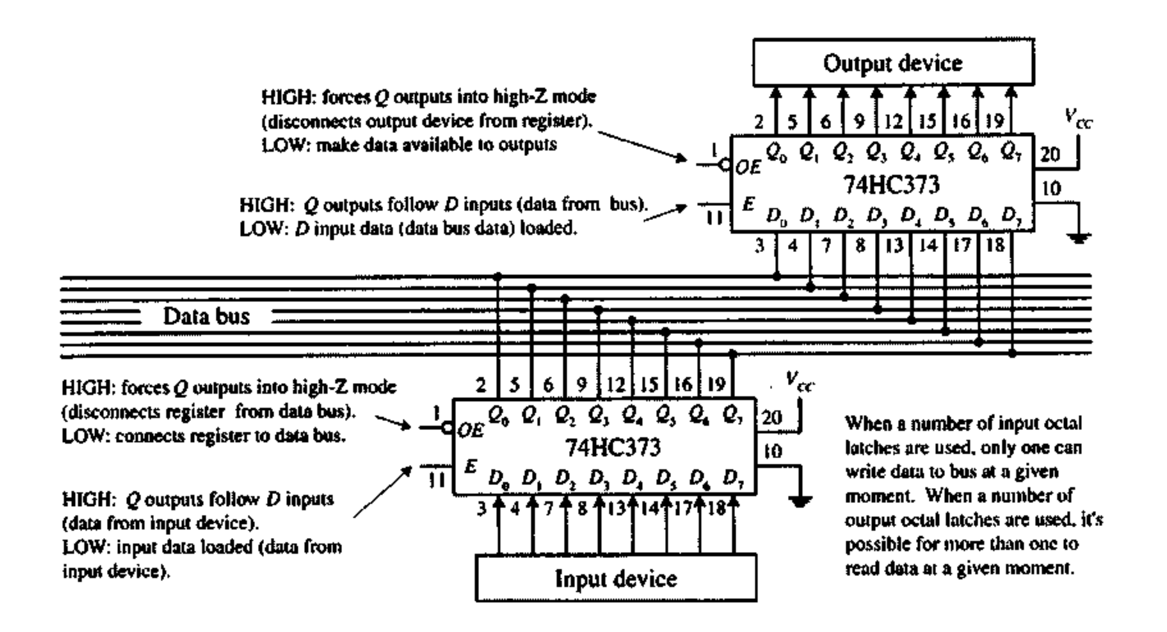
يوجد في داخل الدارة المتكاملة 74XX374 ثمانية قلابات تقدح على الجبهة وبعكس الدارة 74XX373 فإن مخارج القلابات ليست شفافة، أي أنها لا تتبع حالات المداخل ويجب تطبيق جبهة قدح صاعد على المدخل CP لتحميل الدارة قبل أن تصبح المعطيات موجودة على المخارج. تُوضع المخارج في حالة ممانعة عالية بتطبيق high على الدخل ($\overline{OE}$). يبين الشكل (134.12) نظاماً بسيطاً تستخدم فيه الدارة المتكاملة 74HC374 للاتصال مع جهاز خرج عبر ممر معطيات مشترك.



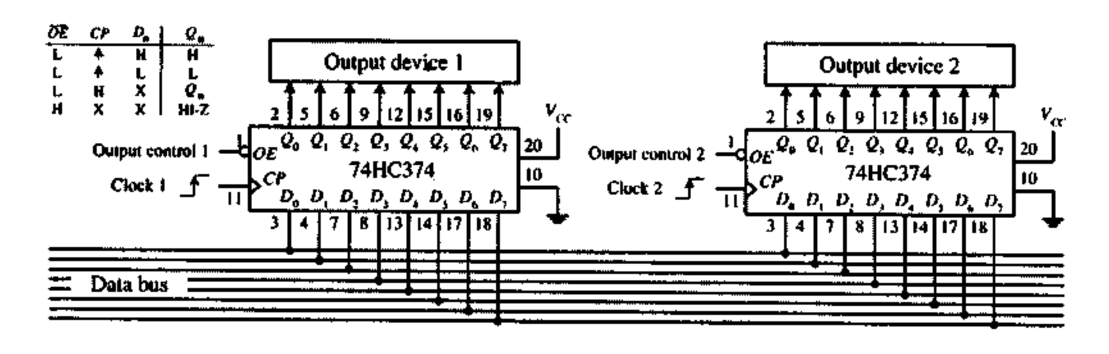
$\overline{OE}$	E	D_n	Q_n
L	H	H	H
L	H	L	L
L	L	X	Q_n
H	X	X	HI-Z

$\overline{OE}$	CP	D_n	Q_n
L	↑	H	H
L	↑	L	L
L	H	X	Q_n
H	X	X	HI-Z

الشكل (132.12): دارات متكاملة لماسك ثماني ثلاثي الحالة ولقلاب D ثلاثي الحالة.



الشكل (133.12): استخدام دارة متكاملة IC (ماسك ثماني ـ ثلاثي الحالة) كمسجل ممر.

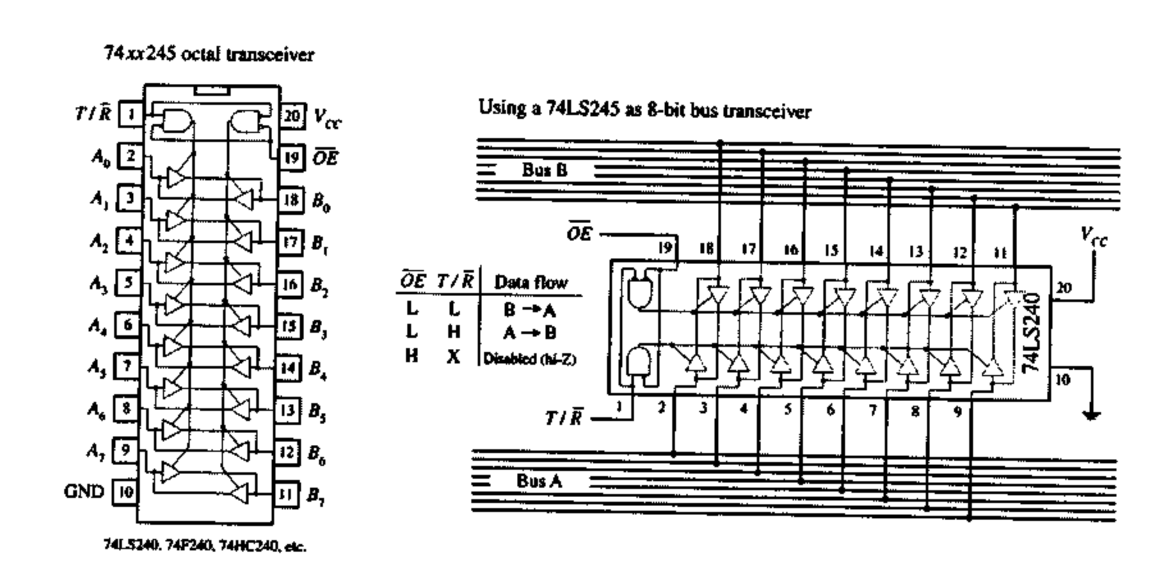


$\overline{OE}$	CP	D_n	Q_n
L	↑	H	H
L	↑	L	L
L	H	X	Q_n
H	X	X	HI-Z

الشكل (134.12): استخدام قلابات D كمسجلات ثلاثية الحالة.

3.9.12 المرسلات المستقبلات

توجد طريقة أخرى لوصل الأجهزة التي تتشارك على ممر مشترك باستخدام المرسل المستقبل (Transceiver)، والمرسل المستقبل هو أداة ثنائية الاتجاه (bidirectional) وعند استخدامه في نظام يحوي ممر فإن الأجهزة الموصولة مع الممر عبر المرسل المستقبل تستطيع القراءة من الممر أو الكتابة فيه (هذه الميزة غير موجودة في العوازل ثلاثية الحالة، أو الماسكات أو القلابات). يبين الشكل (135.12) مرسلاً مستقبلاً 74XX245 وهو عبارة عن دارة متكاملة تحوي ثمانية مرسلات مستقبلات مع مثال بسيط لاستخدام هذه الدارة. وفي الشكل تستخدم الدارة 74LS245 كمرسل مستقبل (أو دارة ربط ثنائية الاتجاه) بين ممري معطيات، ولإرسال معطيات بين ممر A وممر B (من A إلى B مثلاً) فإن مدخل الإرسال/استقبال (T/$\overline{R}$) يوضع في حالة high ويوضع مدخل تمكين الخرج ($\overline{OE}$) في حالة Low. أما عند إرسال معطيات من الممر B إلى الممر A يوضع (T/$\overline{R}$) في حالة Low. يُلغى تفعيل مخارج الدارة المتكاملة (توضع في حالة ممانعة عالية) بتطبيق high على ($\overline{OE}$).

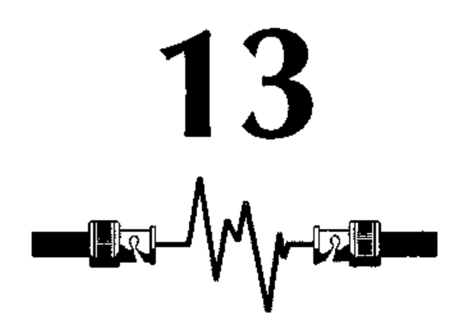


الشكل (135.12): دارة متكاملة لمرسل مستقبل ومثال عن استخدامها.

10.12 مواضيع رقمية إضافية

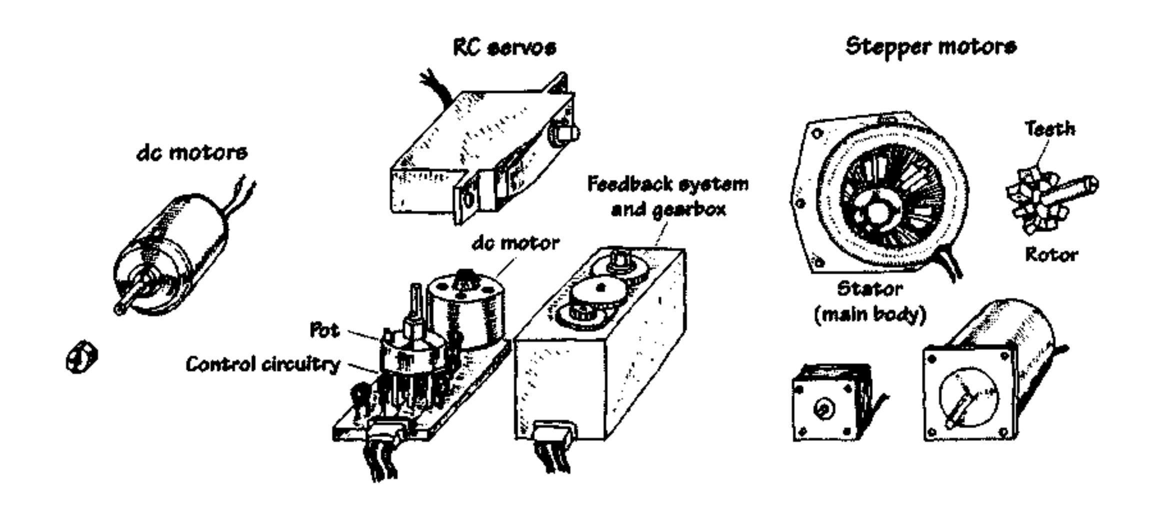
تحوي الملاحق H حتى K على مواضيع رقمية هامة مثل التبديل التشابهي الرقمي والرقمي التشابهي (digital-to-analog)، والإظهار الرقمي، والذواكر والمعالجات الصغرية (microprocessors) والمتحكمات الصغرية (microcontrollers).

13



محركات التيار المستمر، RC Servos، ومحركات الخطوة

ربما تكون أحد أهم الأشياء التي تدعو للتفكير هي استخدام الإلكترونيات في تحريك الأجهزة الميكانيكية، وتوجد ثلاث أدوات أساسية تحرك الأشياء ميكانيكياً وهي محركات التيار المستمر، والـ RC Servos ومحركات الخطوة.



الشكل (13-1): نماذج لمحركات تيار مستمر، RC Servos، ومحركات خطوة.

1.13: محركات التيار المستمر

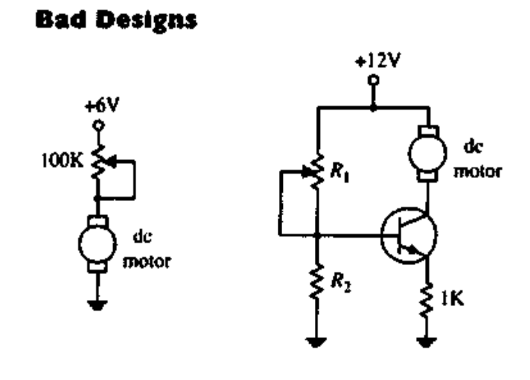
محركات التيار المستمر هي أجهزة يتم التحكم بها كهربائياً ولها سلكان لتوصيل التغذية، ويكون لمحرك التيار المستمر جذع (Shaft) دوار يمكن أن يركب عليه دولاب (Wheel)، أو ترس تغيير سرعة (gear)، أو مروحة أو غيرها. تدور محركات التيار المستمر عدداً كبيراً من الدورات في الدقيقة (rpm) بالنسبة لحجمها، ويمكن أن تدور باتجاه عقارب الساعة أو بعكس عقارب الساعة ويكفي عكس قطبية تغذية المحرك لتدويره باتجاه معاكس. عند الدوران بسرعات منخفضة يكون عزم المحرك منخفضاً ولا يمكن التحكم بدقة بالوضع الزاوي لجذع المحرك مما يجعل استخدام هذه المحركات للتحكم بالموضع غير

ممكن. تتوفر محركات التيار المستمر بحجوم وأشكال مختلفة وأغلب أنواعها تدور بسرعات تتراوح بين (3000) و(8000) دورة في الدقيقة (rpm) عند جهد تشغيل محدد يتراوح بين (1.5) و(24V). وتحدد الجهة الصانعة قيمة جهد التغذية الذي يعمل عنده المحرك بكفاءة عالية. يمكن تخفيض جهد تغذية المحرك قليلاً لتخفيض سرعته، ولكن إذا انخفض جهد التغذية إلى ما دون (50%) من الجهد الاسمي فإن المحرك يتوقف عن الدوران. وكذلك إذا زاد الجهد المطبق على المحرك بنسبة (30%) عن الجهد الاسمي فإن المحرك يسخن (ترتفع حرارته) وقد يتعطل. إن أفضل طريقة للتحكم بسرعة دوران المحرك هي استخدام ما يسمى تعديل عرض النبضة (Pulse Width modulation) وفيها ينتقل المحرك بسرعة بين حالات (On) و(Off) ويتم التحكم بسرعة دوران المحرك حسب عرض النبضة وحسب الفترة الزمنية الفاصلة بين النبضات. يستهلك المحرك (غير المحمل) تياراً صغيراً، ولكن عند تحميل المحرك فإن التيار الذي تستهلكه الملفات الداخلية للمحرك يزداد بشكل هائل (وقد تتجاوز زيادة التيار الـــ 1000% بالمقارنة مع حالة عدم وجود حمل). تعطي الشركات الصانعة ما يسمى (Stall Current) لمحركاتها، أي تيار التوقف، وهو التيار الذي يستهلكه المحرك لحظة توقفه، وإذا كان هذا التيار غير مُعطى فبالإمكان قياسه بواسطة مقياس تيار حيث يوصل مقياس مع المحرك ويوصل حمل إلى جذع المحرك أو يطبق عليه عزم وتسجل قيمة التيار لحظة توقف المحرك. يُعطى معدل عزم المحرك المستمر (torque rating) وهو مقدار القوة التي يستطيع المحرك بذلها على الحمل، والمحرك ذو معدل العزم العالي يستطيع بذل قوة على حمل مثبت بشكل مماسي لذراعه الدوار أكبر من القوة التي يبذلها محرك بمعدل عزم أقل. يُعطى معدل عزم المحرك عادة بـــ (Lb/ft) أو g/cm أو (oz/in).

2.13: التحكم بسرعة محركات التيار المستمر

التصميم السيء Bad Design

توجد طريقة بسيطة للتحكم بسرعة محرك التيار المستمر عن طريق تحديد التيار المار عبر المحرك باستخدام مقسم جهد كما في الدارة اليسارية من الشكل (13-2)، وحسب قانون أوم ينخفض التيار بزيادة المقاومة وتنخفض سرعة المحرك، ولكن استخدام مقسم جهد للتحكم بسرعة دوران المحرك غير فعال (inefficient) لأن زيادة المقاومة تؤدي إلى زيادة تبديد الاستطاعة عليها، وتبدد الاستطاعة على المقاومة بشكل حرارة وهذا شيء غير جيد لأنه يستهلك استطاعة مصدر التغذية ويؤدي إلى تسخين المقاومة، فمن الممكن أن تنصهر المقاومة. يمكن التحكم بسرعة دوران محرك التيار المستمر باستخدام مضخم ترانزستور كما في الدارة اليمينية من الشكل (13-2) ولكن هذه الطريقة قليلة الفعالية والكفاءة أيضاً لأن زيادة تيار المجمع بزيادة تيار القاعدة تؤدي إلى زيادة الاستطاعة المبددة على الترانزستور وقد يؤدي ذلك إلى انهيار الترانزستور.



الشكل (2.13): دارات بسيطة للتحكم بسرعة دوران محرك DC.

تصاميم افضل

تستخدم طريقة للتحكم بسرعة محرك التيار المستمر تشبه الطريقة الواردة في مصادر التغذية التقطيعية، وتمتاز هذه الطريقة بتوفير الطاقة وبعدم تعريض العناصر للانصهار. تعتمد هذه الطريقة على إرسال نبضة تيار إلى المحرك ويتم التحكم بسرعة الدوران بتغيير عرض هذه النبضة وكذلك بتردد نبضات التيار. وبذلك فإن العناصر الموجودة في الدارة لا تخضع لإجهاد تياري دائم. يبين الشكل (13-3) ثلاث دارات بسيطة تستخدم لتأمين نبضات التحكم بالسرعة.

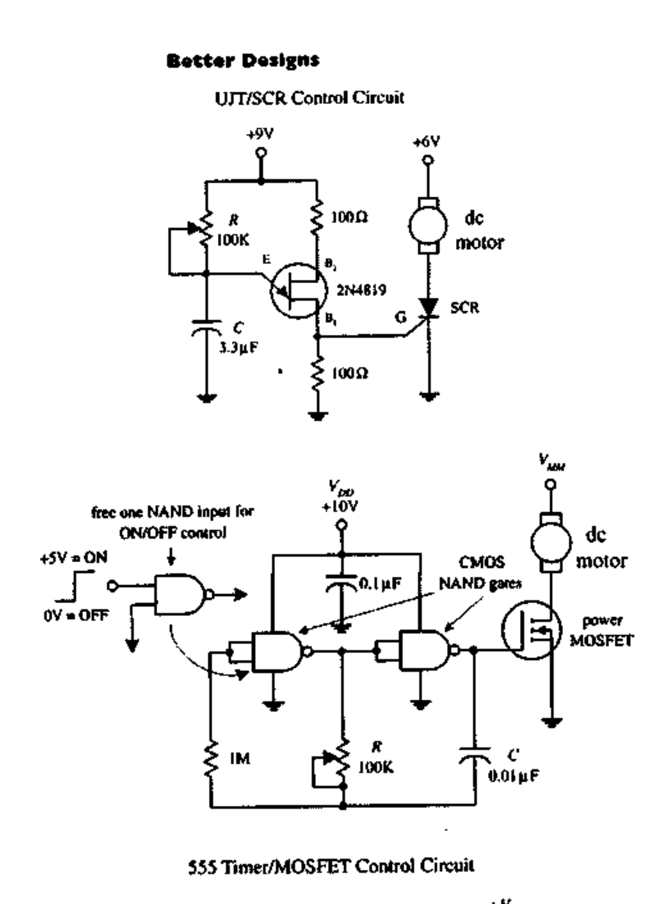
في الدارة الأولى يولد هزاز استرخاء يعمل على UJT سلسلة من النبضات التي تقود ثايرستور SCR (On) وOff. يُضبط تردد النبضات وبالتالي سرعة دوران المحرك بواسطة دارة RC، لأن التردد يتغير بتغير الثابت الزمني.

في الدارة الثانية يستخدم زوج من بوابات NAND لتكوين هزاز استرخاء ويستخدم ترانزستور MOSFET من النوع المعزز لقيادة المحرك. وكما في الدارة السابقة تتعلق سرعة المحرك بالثابت الزمني RC للدارة. يمكن ترك أحد مداخل بوابة NAND اليسارية مفتوحاً واستخدامه كمدخل تحكم off/on ويمكن وصل هذا المدخل مع دارة منطقية CMOS لتأمين إشارة القيادة.

في الدارة الأخيرة من الشكل (13-3) تستخدم دارة 555 كمولد نبضات مربعة ويؤمن وصل الديود كما في الشكل مع المقاومة (R_2) نبضات خرج بدورة مشغولية منخفضة (Low duty cycle). يتعلق تردد نبضات clock بقيم العناصر (R_1)، (R_2)، و(C) وتعطى الأزمنة التي تكون خلالها النبضات في حالة On أو Off بالعلاقات التالية:

$$t_{on} = 0.693 R_1 C$$

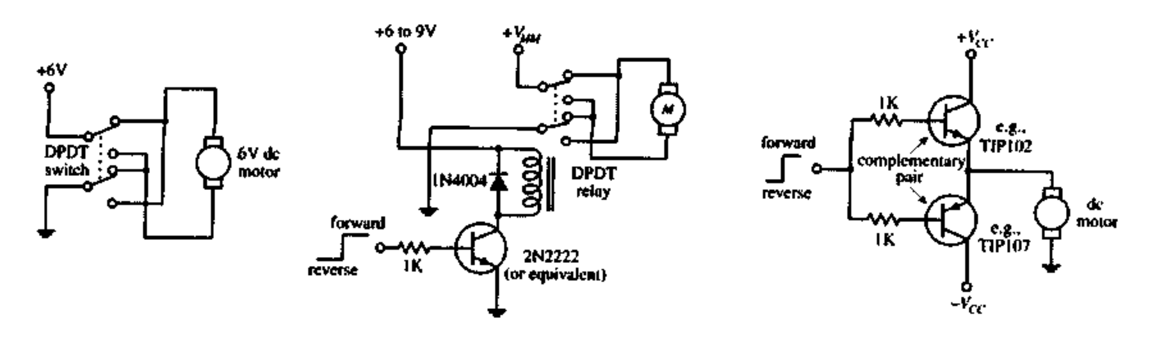
$$t_{off} = 0.693 R_2 C$$



الشكل (3.13): دارات بسيطة للتحكم بسرعة محرك DC.

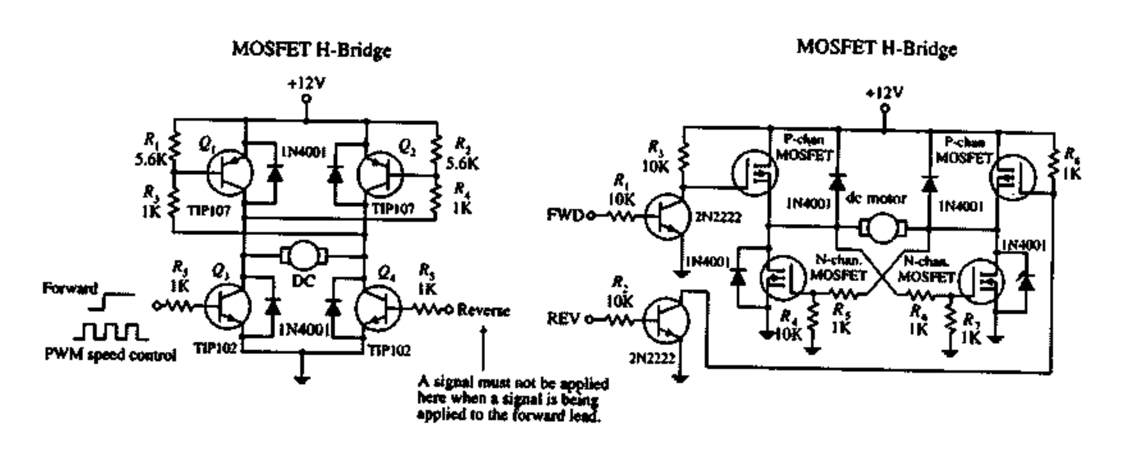
3.13: التحكم الاتجاهي بمحركات التيار المستمر

يجب عكس قطبية الجهد المطبق على أطراف المحرك للتحكم بجهة دورانه وأبسط طريقة لتغيير قطبية الجهد تتم باستخدام مفتاح DPDT كما في الدارة اليسارية من الشكل (13-4) ويتم يدوياً اختيار الوضع المناسب للمفتاح بحيث يدور المحرك بالجهة المطلوبة. يمكن استخدام مفتاح DPDT مقاد بواسطة حاكمة في الدارة الموجودة في الوسط. إذا كنت لا تحب الحواكم استخدام دارة دفع- جذب ترانزستورية كما في الطرف اليمني من الشكل (13-4). تحوي هذه الدارة ترانزستورين أحدهما npn والآخر pnp لهما نفس معدل الاستطاعة ونفس عامل تكبير التيار (Similar beta). عند تطبيق جهد high (أو 5V+) على القواعد ينتقل ترانزستور الـ (npn) إلى حالة (On) ويمر تيار من موجب التغذية عبر الترانزستور إلى المحرك فالأرض ويدور المحرك بجهة وعند تطبيق (0V) على القواعد ينتقل الترانزستور (pnp) إلى حالة (on) ويمر تيار من الأرض عبر المحرك والترانزستور pnp إلى سالب المصدر V_{cc}- ويدور المحرك بجهة معاكسة للجهة الأولى.



الشكل (4.13): دارات بسيطة للتحكم بجهة دوران محرك DC.

توجد دارة أخرى شائعة جداً للتحكم بجهة دوران محرك التيار المستمر (وكذلك للتحكم بالسرعة) وهي دارة الجسر H، ويبين الشكل (13-5) نموذجين بسيطين من دارة الجسر H. الدارة اليسارية مصممة على ترانزستورات ثنائية القطبية، أما الدارة اليمينية فمصممة على ترانزستورات MOSFET. لجعل المحرك يدور بالاتجاه الأمامي (forward direction) يطبق جهد (5V +) على مدخل الدوران الأمامي، ولا تطبق أية إشارة على مدخل الدوران العكسي (لا يسمح بتطبيق جهد على المدخلين في وقت واحد). يتم التحكم بسرعة دوران المحرك عن طريق التحكم بعرض النبضات المطبقة على الدخل. عند تطبيق جهد على قاعدة الترانزستور (Q3) ينتقل Q3 إلى حالة تمرير ويسمح ذلك للترانزستور (Q2) بأن ينتقل أيضاً إلى حالة تمرير ويمر تيار عبر المحرك من الطرف اليميني إلى اليساري (لنفترض أن المحرك يدور في هذه الحالة بالاتجاه الأمامي). لتدوير المحرك بعكس الاتجاه تُفصل الإشارة عن دخل (Q3) وتطبق على قاعدة (Q4) فينتقل (Q4) و(Q1) معه إلى التمرير ويمر تيار عبر المحرك من اليسار إلى اليمين ويدور المحرك باتجاه عكسي. يعمل جسر H المبني على ترانزستورات MOSFET بنفس الطريقة. تساعد الديودات الموجودة في الدارة على تخميد القفزات العابرة التي تنتج عن ملفات المحرك وبذلك تتم حماية باقي عناصر الدارة من التأثر بهذه الومضات. كافة الترانزستورات (ما عدا الترانزستورات ثنائية القطبية الموجودة في الدارة اليمينية) يجب أن تكون ترانزستورات استطاعية.



الشكل (5.13): دارات الجسر H للتحكم بجهة دوران محركات التيار المستمر.

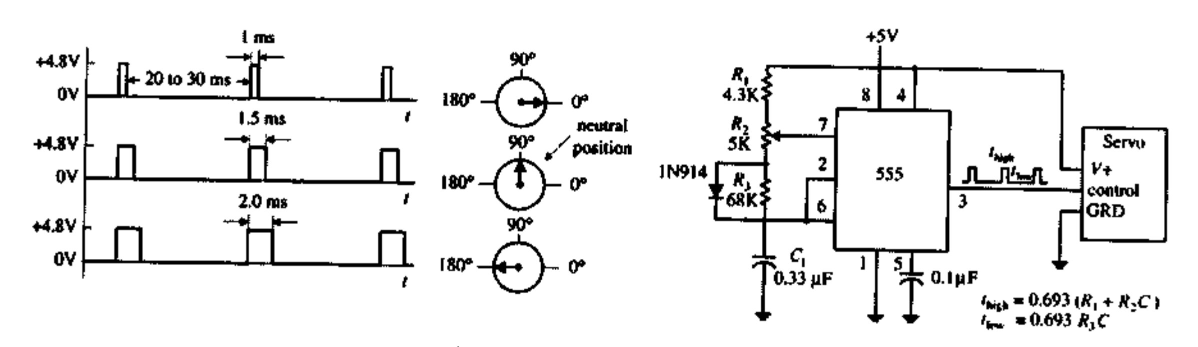
يمكن تشكيل دارات الجسر H بواسطة عناصر منفصلة، ولكن الأسهل والأرخص هو شراء دارة متكاملة لقيادة محرك التيار المستمر، وعلى سبيل المثال تعتبر الدارة المتكاملة LMD 18200 من شركة National Semiconductor نموذجاً عن دارات قيادة المحركات وهي دارة متكاملة سهلة الاستخدام عالية التيار وتعمل بتيار حتى 3A وجهد يتراوح بين (12) و(55V). وهي أيضاً متآلفة مع عوائل TTL وCMOS وتحوي ديودات تحديد داخلية وحماية من قصر الحمل وخرج مقاطعة

للتحذير من ارتفاع درجة الحرارة، والدارة L393D هي أيضاً دارة متكاملة IC شائعة الاستخدام في قيادة المحركات وهي رخيصة الثمن وسهلة الاستخدام ولكنها لا تعمل عند نفس تيارات الدارة LMD18200 ولا تمتلك أية ميزات إضافية.
توجد أنواع أخرى عديدة من الدارات المتكاملة المخصصة لقيادة المحركات وغيرها من اللوحات المصنعة مسبقاً لقيادة عدد من المحركات. يمكنك البحث في الكتالوكات وفي الإنترنت لمعرفة الدارات المتكاملة المتوفرة لقيادة المحركات.

4.13: سيرفو التحكم عن بعد RC

سيرفو التحكم عن بعد (Remote Control Servo) RC هو أداة تشبه المحرك ويصمم لتطبيقات التحكم بالموضع التي تشبه التحكم بمؤشر (Pointer like position control). تستخدم هذه الأدوات إشارة خارجية ذات عرض نبضة معدل PWM للتحكم بموضع الجذع ضمن حيز صغير من مجال الدوران الأعظمي. يتم تغيير عرض النبضة من أجل تغيير وضع الجذع ويتحدد مقدار الدوران الزاوي لجذع السيرفو بحوالي 180° إلى 210° ويتعلق ذلك بنوع السيرفو المستخدم ويستطيع السيرفو تأمين قدر مناسب من العزم منخفض السرعة (بسبب وجود نظام تخفيض سرعة) كما يؤمن سرعات فتح وإغلاق متوسطة من أجل إزاحة كاملة. يستخدم السيرفو عادة في الأجهزة الآلية (robotics) وللتحكم بالاتجاه في نماذج السيارات والقوارب والطائرات إضافة إلى استخدامه في تطبيقات أخرى.

يبدو سيرفو RC المعياري كصندوق بسيط له جذع قيادة وتخرج منه ثلاثة أسلاك وهذه الأسلاك هي سلك تغذية (عادة لونه أحمر) وسلك أرضي (لونه أسود) وسلك للتحكم بموضع الجذع (ويختلف لونه حسب الجهة الصانعة). يوجد في الصندوق محرك تيار مستمر، أداة تغذية عكسية، ودارة تحكم. تتكون أداة التغذية العكسية عادة من مقسم جهد مقبض تحكمه موصول مع المحرك عن طريق سلسلة من مخفضات السرعة، عند دوران المحرك يدور مقبض التحكم بمقسم الجهد، وعادة تكون زاوية دوران الجذع محددة بـ 180° أو 210° وبذلك لا يدور مقبض مقسم الجهد بشكل دائري كامل. يستخدم مقسم الجهد كعنصر مراقبة للموضع وبواسطته تتعرف الدارة تماماً على مقدار دوران الجذع (من خلال مقاومته). تستخدم دارة التحكم قيمة مقاومة مقسم الجهد مع إشارة دخل بعرض نبضة معدل لقيادة المحرك بحيث يدور عدداً محدداً من الدرجات ثم يتوقف (يختلف مقدار عزم التوقف من سيرفو إلى سيرفو) ويتحدد مقدار دوران جذع السيرفو بعرض نبضة إشارة الدخل.



الشكل (6.13): إشارة تحكم نموذجية بالسيرفو واستجابة موضع الجذع ودارة قيادة سيرفو بسيطة.

عندما يكون عرض النبضة (1.5ms) يدور السيرفو إلى الموقع الحيادي (مثلاً الزاوية 90° هي الموقع الحيادي بين 0 و180°). ولكي يدور السرفو عدداً محدداً من الدرجات من الموقع الحيادي يتم تغيير عرض إشارة التحكم، ولجعل السيرفو يدور بعكس عقارب الساعة تطبق على مدخل التحكم إشارة عرضها أكثر من 1.5ms، ولتدوير الجذع مع عقارب الساعة تطبق على مدخل التحكم إشارة بعرض أقل من (1.5ms) ويختلف عرض النبضة كي يدور السيرفو ويحقق إنزياحاً زاوياً دقيقاً من سيرفو إلى آخر فمثلاً يحقق بعض أنواع أجهزة السيرفو دوراناً أعظمياً بعكس عقارب الساعة إذا كان عرض

النبضة (1ms) ودوراناً أعظمياً مع عقارب الساعة عند عرض نبضة يساوي (2ms) أما بعضها الآخر فيحقق الدوران الأعظمي بعكس عقارب الساعة عند عرض نبضة (1.25ms) وبعكس عقارب الساعة عندما يكون عرض النبضة (1.75ms). يستخدم عادة جهد تغذية يساوي 4.8V لتغذية السيرفو وقد تصل قيمة هذا الجهد إلى 6v+ حسب نوع السيرفو المستخدم وطرازه. يختلف التيار الذي يستهلكه السيرفو كثيراً حسب استطاعة خرج السيرفو. يمكن استخدام دارة 555 بسيطة كالدارة المبينة في الشكل لتوليد إشارة قيادة السيرفو وتستخدم R_2 للتحكم بعرض النبضة. يمكن أيضاً قيادة السيرفو بواسطة معالج صغري (microprocessor) أو بواسطة متحكم صغري (Microcontroller) عند استخدام السيرفو المتحكم في نموذج طائرة تُرسل إشارة تحكم أولية (يتم توليدها عن طريق تغيير قيمة مقسم الجهد المستخدم كمتحكم) إلى دارة معدل موجة راديوية تقوم بترميز إشارة التحكم ضمن الموجة الحاملة ويتم بث الموجة الحاملة كموجة راديوية (radiwave) بواسطة الهوائي وترسل الموجة الرديوابة إلى هوائي في الاستقبال في الطائرة ومنه إلى دارات المستقبل في جهاز التحكم حيث تتم استعادة إشارة التحكم عن طريق كشف التعديل وتطبق إشارة التحكم على السيرفو المخصص للتعامل معها وإذا كانت دارة التحكم تحوي أكثر من سيرفو فمن الضروري استخدام أكثر من قنال لإرسال إشارات التحكم. تحتاج أغلب الطائرات المتحكم بها لا سلكياً إلى جهاز لا سلكي بأربع أقنية للتحكم بالطائرة حيث تستخدم إحدى الأقنية للتحكم بالجنيحات وقناة أخرى للتحكم بالموجة (rudder) والثالثة للتحكم بالسرعة والرابعة للتحكم بالارتفاع، وتستخدم قناة خامسة أحياناً للتحكم بميزات أخرى كالتحكم بآلية الهبوط. تخصص الأقنية (11-60) في المجال الترددي 72MHz للتحكم بالطائرات ويمكن أيضاً استخدام مجال الـ 50MHz. توجد ترددات في مجال الـ 72MHz مخصصة أيضاً لأغراض التحكم، وإذا كنت مهتماً بأجهزة السيرفو المقادة عن بعد (RC Servos) بواسطة الأجهزة اللاسلكية ننصحك بالبحث في المحلات التجارية التي تتعامل بهذه الأجهزة لأنها تقدم أجهزة إرسال واستقبال وأجهزة سيرفو لهذه الأغراض. يمكن تحويل السيرفو إلى محرك قيادة بدوران غير محدود عن طريق إلغاء حلقة التغذية العكسية وفصل الطرف الثالث لمقسم الجهد وعدم وصل (ربط) نظام تغيير السرعة (gear system) بحيث يدور المحرك (360°). يمكن استبدال مقسم الجهد بمقاومتين ثابتتين (ويحل خرج مقسم الجهد محل الذراع الثالثة للمقاومة المتغيرة). يستخدم مقسم الجهد لجعل دارة التحكم بالسيرفو تضبط الجذع على الوضع الحيادي. يمكن تحديد قيم المقاومات الثابتة التي تستخدم بدل المقاومة المتغيرة بواسطة مقياس أوم وقياس المقاومات بين الذراع الثالث للمقاومة المتغيرة والأذرع الأساسية.

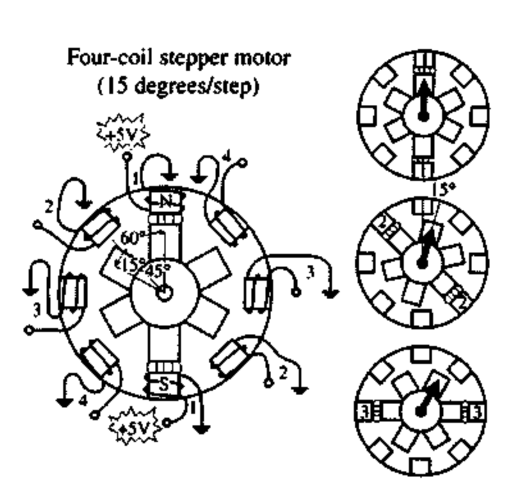
بعد تحويل السيرفو إلى محرك، يمكن تدوير المحرك باتجاه عقارب الساعة بتطبيق نبضة بعرض (1.5ms) على مدخل التحكم وطالما بقيت إشارة التحكم مطبقة على الدخل يستمر المحرك بالدوران -لأنك ألغيت نظام التغذية العكسية. من أجل تدوير السيرفو بعكس عقارب الساعة تطبق على الدخل نبضة بعرض أقل من (1.5ms).

5.13: محركات الخطوة

محركات الخطوة (Steppers) هي محركات يتم التحكم بها رقمياً وتدور عدداً محدداً من الدرجات (خطوة) في كل مرة تُطبق فيها نبضة clock على دارة خاصة تستخدم للتحكم بمحرك الخطوة. إن عدد الدرجات في الخطوة الواحدة لمحرك الخطوة يمكن أن يكون صغيراً إلى حد 0.72° في الخطوة الواحدة أو كبيراً ويصل إلى 90° في الخطوة. في المحركات العامة التي تستخدم في تطبيقات متعددة الأغراض يتراوح عدد الدرجات في الخطوة بين (15) و(30°).

يدور محرك الخطوة، بعكس السيرفو 360° ويمكن جعله يدور بشكل دائم مثل محرك dc (ولكن سرعة دورانه الأعظمية أقل من سرعة محرك dc). تؤمن محركات الخطوة عزماً كبيراً عند سرعات دوران منخفضة مما يجعل هذه المحركات مفيدة جداً في التحكم بالموضع بدقة عالية وسرعات منخفضة. تستخدم محركات الخطوة في الطابعات للتحكم بتغذية الطابعة بالورق كما تستخدم في التيليسكوبات التي تُلاحق النجوم. تستخدم محركات الخطوة أيضاً في الراسمات (Plotters) وفي تطبيقات أخرى عديدة منها تحديد الموضع أو الدوران إلى موضع باستخدام الحساسات. سنتعرف الآن على مبدأ عمل محرك الخطوة من خلال الشكل (13-7).

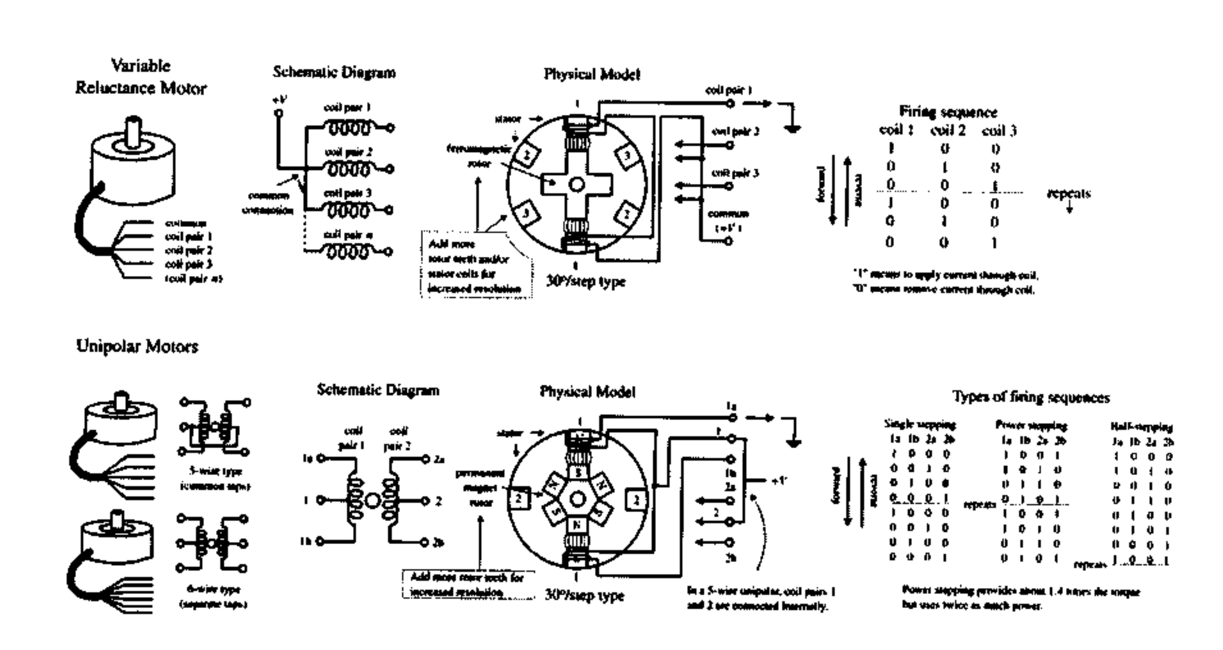
يبين الشكل نموذجاً بسيطاً لمحرك خطوة يدور (15°) في الخطوة الواحدة يتكون القسم الثابت في هذا المحرك من ثمانية أقطاب متباعدة عن بعضها بمقدار (45°). يُصنع القسم المتحرك والذي يسمى الدوار (rotor) من مادة فيرومغناطيسية (ferromagnetic material) وله ستة أسنان والزاوية بين كل سنين هي (60°). يُطبق التيار على قطبين متقابلين أو على ملفين متقابلين في آن واحد كي يدور المحرك خطوة واحدة. يؤدي تطبيق التيار إلى مغنطة الأقطاب المتعاكسة وهذا يجعل أسنان القسم الدوار تصبح على نفس استقامة الأقطاب المغذاة. لتدوير الدوار (rotor) (15°) باتجاه عقارب الساعة (ابتداءً من الوضع الحالي) فإن التغذية تُفصل عن الملف (1) وتوصل إلى الملف (2) وإذا فصلت التغذية عن القطب 2 ووصلت مع القطب (3) يدور المحرك (15°) أخرى وتستمر عملية التحريك بنفس الطريقة، يُعكس تتالي تغذية الملفات عند الرغبة بتدوير المحرك بعكس عقارب الساعة.



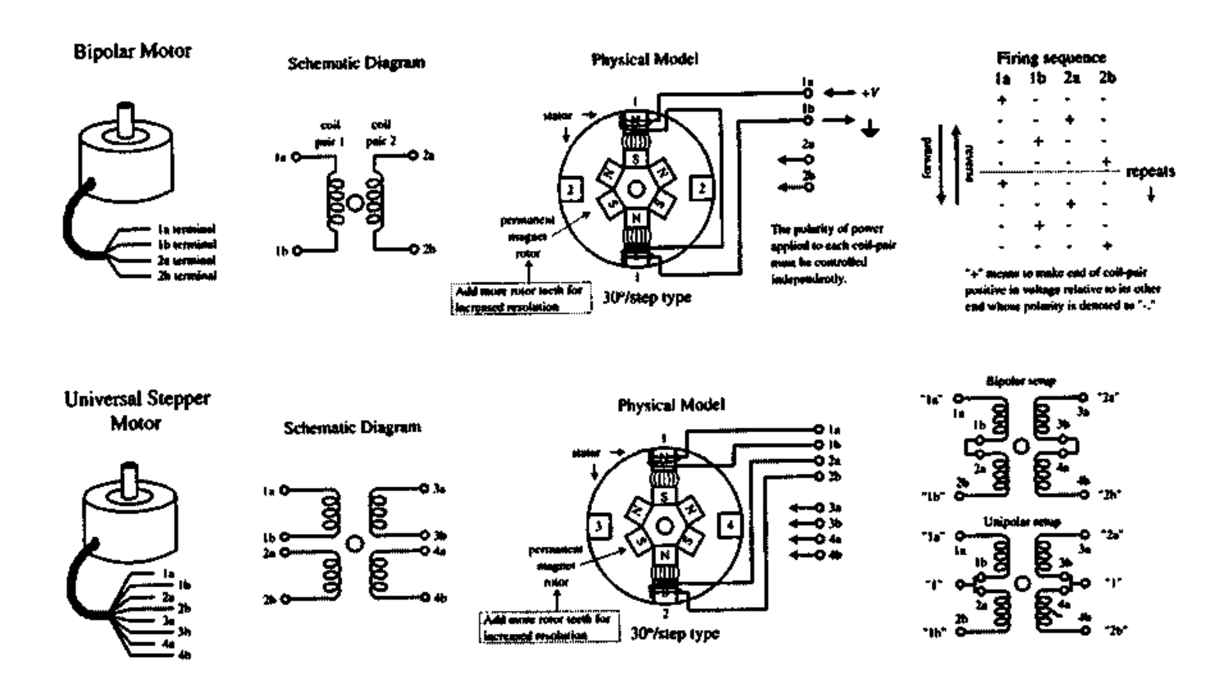
الشكل (7.13): محرك خطوة بأربعة ملفات، زاوية الدوران 15° في الخطوة.

6.13: أنواع محركات الخطوة

يعتمد محرك الخطوة المبين في الشكل السابق على الممانعة المغناطيسية المتغيرة (variable-reluctance)، وكما هو واضح فإن النموذج السابق غير كامل لأنه لا يوضح التوصيلات الداخلية لمحرك الخطوة ذي الممانعة المغناطيسية المتغيرة. كما أن النموذج السابقة لا ينطبق على نموذج آخر من محركات الخطوة ذات المغناطيس الدائم، وسنتعرف الآن على بعض أنواع محركات الخطوة المستخدمة في الحياة العملية.



الشكل (8.13): بعض الأنواع العملية لمحركات الخطوة.



تابع الشكل (8.13): بعض الأنواع العملية لمحركات الخطوة.

محركات الخطوة ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة

يبين الشكل (8-13) نموذجاً فيزيائياً ومخطط توصيل لمحرك خطوة ذي ممانعة مغناطيسية متغيرة يدور (30°) في الخطوة. يتكون هذا المحرك من ستة أقطاب (أو ثلاثة أزواج من الملفات) وهذه الأقطاب تشكل القسم الثابت (Stator) ومن دوار فرومغناطيسي له أربعة أسنان.

تُصنع محركات الخطوة من هذا النوع والتي لها دقة دوران أعلى بحيث يكون عدد أزواج الملفات و/أو عدد الأسنان أكبر. يُلاحظ من مخطط التوصيل ومن النموذج الفيزيائي بأن نهايات كافة أزواج الملفات موصولة إلى نقطة واحدة مشتركة، وهذا الوصل إلى نقطة مشتركة هو وصل داخلي (ضمن جسم المحرك). يخرج من جسم المحرك الخط المشترك والأطراف الحرة للملفات، وتسمى هذه الأسلاك بالأسلاك الطورية. يُوصل الخط المشترك إلى جهد التغذية، أما الأسلاك الطورية فيتم تأريضها بالتتالي (Sequence) المعطى في الجدول المرفق بالشكل (8-13) إلى يمين النموذج الفيزيائي للمحرك.

محركات الخطوة ذات المغناطيس الدائم (وحيد القطبية، ثنائي القطبية، العمومي)

المحركات وحيدة القطبية

لهذه المحركات قسم ثابت مشابه للقسم الثابت في محركات الخطوة ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة ولكن القسم الدوار فيها عبارة عن مغناطيس دائم، كما أن توصيلاتها الداخلية مختلفة. يبين الشكل (8-13) محركاً وحيد القطبية يدور بزاوية (30°) في الخطوة الواحدة. يتكون المحرك من أربعة أقطاب (زوجين من الملفات) مع فرعات مركزية بين أزواج الأقطاب، أما القسم الدوار فهو مغناطيس دائم له ستة أسنان. يمكن أن توصل الفرعات المركزية داخلياً وتخرج من جسم المحرك كسلك واحد، ويمكن أيضاً أن تخرج كسلكين. توصل الفرعات المركزية عادة إلى مصدر التغذية، أما الأطراف الحرة من أزواج الملفات فيتم تأريضها بالتناوب لعكس اتجاه الحقل الذي ينتجه الملف. وكما يتضح من الشكل، عند مرور التيار من الفرعة المركزية للملف (1) خارجاً من الطرف (1a) فإن القطب العلوي من الثابت يصبح قطباً شمالياً، أما القطب السفلي فيصبح قطباً جنوبياً، ولذلك يتحرك القسم الدوار إلى الموقع.

إذا فُصل التيار عن الملف (1) وطبق على الملف (2) ليخرج من الطرف (2a) فإن الأقطاب الأفقية تصبح مغذاة ويدور القسم الدوار (30°)، أو خطوة واحدة. تُعطى في الشكل (13-8) ثلاثة تتابعات تشغيل. يؤمن التتابع الأول عملاً خطوياً كاملاً (وقد نوقش هذا التتابع للتو)، أما التتابع الثاني والذي يسمى تتابعاً خطوياً استطاعياً (Power Stepping Sequence)، فإنه يؤمن عملاً خطوياً كاملاً بعزم يساوي (1.4) ضعفاً بالمقارنة مع الحالة السابقة ولكن استهلاك الاستطاعة يتضاعف. يؤمن التتابع الثالث خطوة دوران تساوي (15°)، أي نصف الخطوة السابقة. يمكن تحقيق دوران بنصف خطوة عن طريق تغذية الأقطاب المتجاورة في نفس الوقت، لأن ذلك يجذب القسم الدوار إلى ما بين الأقطاب، ويدور القسم الدوار بزاوية تساوي نصف خطوة. تصمم محركات الخطوة وحيدة القطبية بعدد أسنان أكبر للقسم الدوار. تتوفر محركات الخطوة وحيدة القطبية بنماذج ذات خمسة- أو ستة أسلاك. في النموذج خماسي الأسلاك تكون الفرعات الوسطى موصولة داخلياً مع بعض، أما في النماذج سداسية الأسلاك فإن الفرعات الداخلية لا تكون موصولة داخلياً.

محركات الخطوة ثنائية القطبية

هذه المحركات تشبه المحركات وحيدة القطبية ولكن أزواج ملفاتها ليس لها فرعة وسطى، وهذا يعني أنه بدلاً من تطبيق جهد تغذية ثابت على ناقل (سلك) كما كانت الحال في المحركات وحيدة القطبية (كان جهد التغذية يوصل بشكل دائم مع الفرعات الوسطى)، يجب أن يُطبق جهد التغذية بشكلٍ متعاقب على نهايات ملفات مختلفة. وبنفس الوقت فإن النهايات المعاكسة لزوج الملفات يجب أن توصل مع الأرض. يدور المحرك المبين في الشكل (13-8) بمقدار (3°) في الخطوة بتطبيق القطبيات المبينة في جدول التتابع، وتطبق القطبيات على أطراف (أسلاك) المحرك.

لاحظ أن تتابعات التشغيل تستخدم نفس تشكيلات القيادة الأساسية الواردة في محرك الخطوة وحيد القطبية ولكن إشارات الـ "0" والـ "1" قد استبدلت بـ "+" و"-" لتوضيح أهمية القطبية، وكما ستلاحظ في الفقرة التالية فإن الدارة التي تستخدم لقيادة محرك خطوة ثنائي القطبية تتطلب دارة جسر H لكل زوج من الملفات. تعتبر قيادة محركات الخطوة ثنائية القطبية أكثر صعوبة من قيادة المحركات وحيدة القطبية والمحركات ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة، ولكن خاصيتها الفريدة في إزاحة القطبية تعطيها نسبة حجم إلى عزم أفضل. تصمم المحركات ثنائية القطبية ذات زاوية الدوران الأصغر في الخطوة بعدد أسنان أكبر.

محركات الخطوة العمومية

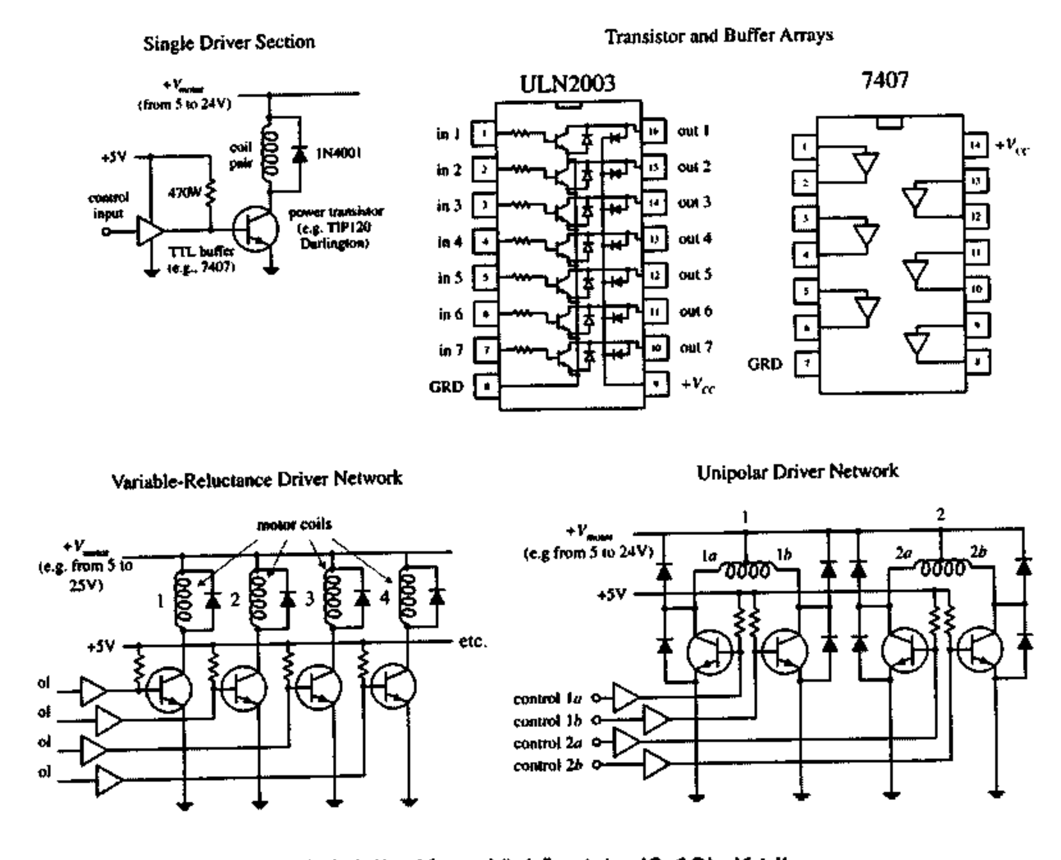
تمثل هذه المحركات الخطوية نموذجاً هجيناً من المحركات وحيدة وثنائية القطبية. للمحرك العمومي أربعة ملفات مستقلة وثمانية أسلاك. بوصل الملفات على التوازي كما في الشكل (13-8) فإن المحرك العمومي يتحول إلى محرك خطوي وحيد القطبية، أما إذا وصلت الملفات على التسلسل فإن المحرك يتحول إلى محرك خطوي ثنائي القطبية.

7.13: قيادة المحركات الخطوية

يحتاج كل محرك خطوة إلى دارة قيادة تستطيع التحكم بتدفق التيار الذي يمر عبر ملفات القسم الثابت في المحرك، ودارة القيادة بدورها يجب أن تقاد بواسطة دارة منطقية تسمى translator سوف نناقش هذه الدارات بعد تغطية دارات القيادة. يبين الشكل (13-9) دارات قيادة لمحركات خطوة من النوع ذي الممانعة المغناطيسية المتغيرة ومن النوع وحيد القطبية. تستخدم دارات قيادة النوعين ترانزستورات للتحكم بالتيار المار عبر ملفات المحرك. تُضاف مراحل عزل دخل، في كلتا دارتي القيادة من أجل حماية دارة الـ translator من جهد تغذية المحرك في حالة انهيار متصل القاعدة مجمع للترانزستور. كذلك تضاف ديودات إلى دارات القيادة لحماية الترانزستورات ومصدر التغذية من الارتداد الجهدي التحريضي الناتج عن ملفات المحرك. (لاحظ استخدام ديودات إضافية في دارة قيادة المحرك وحيد القطبية لأن الارتداد الجهدي يمكن أن يتسرب إلى كلا طرفي الفرعة المركزية. يمكن استبدال زوج الديودات ضمن دارة القيادة بديود واحد ويبقى عدد الديودات أربعة فقط). إن

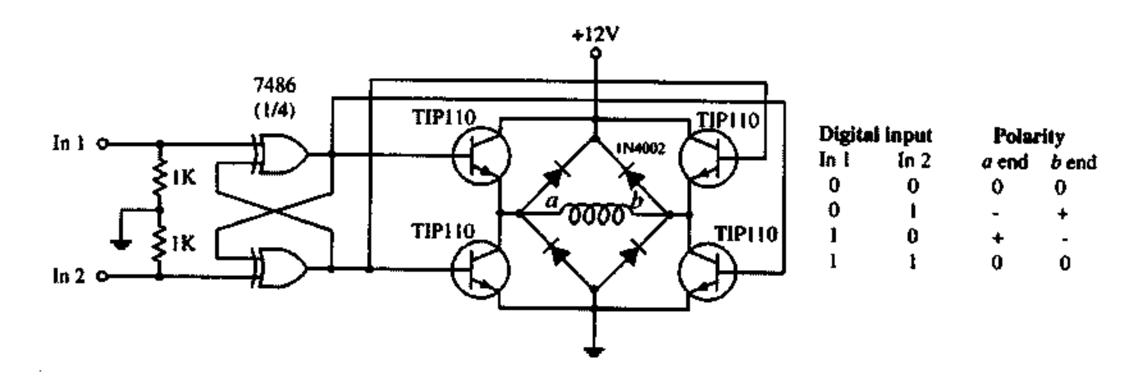
دارة القيادة المكونة من ترانزستور قيادة واحد والموجودة في الشكل (13-9) تعطيك فكرة عن أنواع العناصر التي يمكن استخدامها في دارات القيادة. تستخدم هذه الدارة ترانزستور قيادة دارلنغتون (Darlington Transistor) عالي الاستطاعة، وعازل TTL وديود حماية سريع (الديود الإضافي يجب أن يكون موجوداً في دارة قيادة المحرك وحيد القطبية). إذا كنت لا ترغب باستخدام العناصر المنفصلة فبإمكانك استخدام دارات متكاملة IC لمصفوفات ترانزستورية، مثل سلسلة ULN200X من شركة Allegro Microsystems، أو سلسلة DS200X من شركة National Semiconductors. الدارة المتكاملة ULH2003 المبينة في الشكل (13-9) هي شريحة متآلفة مع TTL وتحوي سبعة ترانزستورات دارلنغتون مع ديودات حماية داخلية. يمكن استخدام دارة العوازل المتكاملة 7407 مع الدارة ULN2003 لتشكيل دارة قيادة كاملة لمحرك خطوي.

تستطيع الدارة المتكاملة MC1413 وهي عبارة عن مصفوفة ترانزستورات دارلنغتون قيادة ملفات محرك متعددة مباشرة من المداخل المنطقية.



الشكل (9.13): دارات قيادة لمحركات الخطوة.

تتطلب دارات قيادة محركات الخطوة ثنائية القطبية استخدام جسر H. تعمل دارة الجسر H على عكس القطبية المطبقة على زوج ملفات ضمن محرك الخطوة (راجع فقرة التحكم بجهة دوران محرك التيار المستمر باستخدام دارة الجسر H). تلزم دارة جسر H منفصلة لكل زوج من الملفات الموجودة ضمن محرك الخطوة. تستخدم دارة جسر H المعطاة في الشكل (13-10) أربعة ترانزستورات دارلنغتون وهذه الترانزستورات محمية من الارتداد الجهدي العكسي بواسطة ديودات. أُضيفت إلى الدارة دارة بوابات XOR منطقية لمنع إشارتي high (1's) على المداخل في نفس الوقت. إذا طبقت إشارتا high على المدخلين، بفرض عدم وجود دارة منطقية، فإن مصدر التغذية يقصر إلى الأرض وهذا غير جيد بالنسبة لمصدر التغذية. يبين الجدول المعطى في الشكل (13-10) التتابع المناسب للعمل لخلق القطبيات الصحيحة.



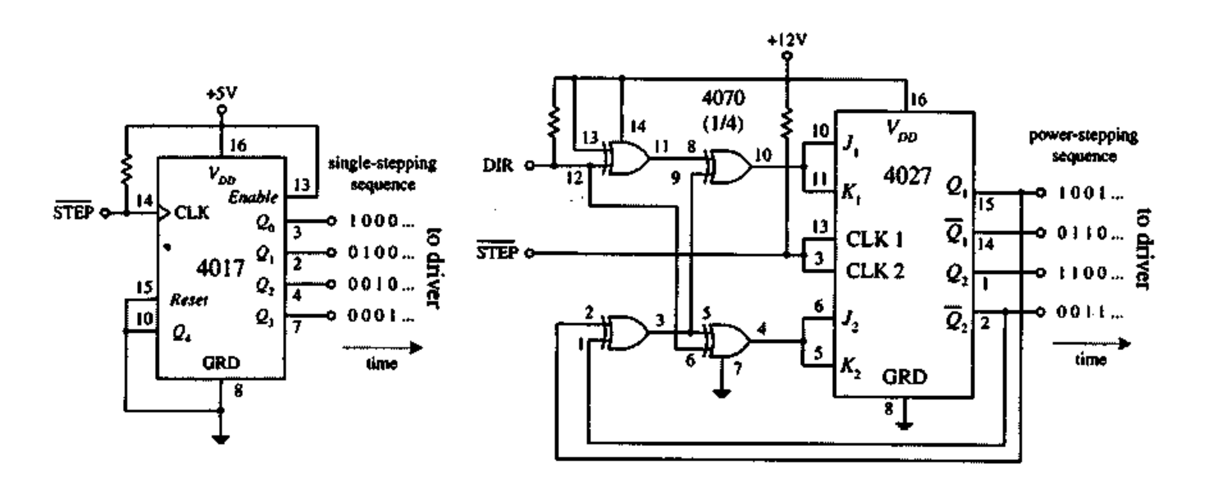
الشكل (10.13): دارة جسر H باستخدام ترانزستورات ثنائية القطبية.

وكما ذكرنا في فقرة محرك التيار المستمر فإن الجسور H يمكن أن تشترى كدارة متكاملة IC جاهزة، وكمثال على ذلك الدارة المتكاملة L293 من SGS Thomson، وتحوي هذه الدارة بداخلها جسري H، ويمكن استخدامها لقيادة محركات خطوة صغيرة تستهلك تياراً حتى 1A لكل ملف وبجهد حتى 36V. الدارة L298 (أيضاً تحوي جسري H) تشبه الدارة L293 ولكنها تستطيع التعامل مع ملفات تحتاج حتى 2A. تتعامل الدارة المتكاملة LMDI 8200 مع تيارات حتى 3A وتحوي ديودات حماية داخلية، بعكس الدارات L298 وL293. توجد أنواع أخرى من الدارات المتكاملة للجسر H، وعليك البحث في الكتالوكات لمعرفة ما يتوفر.

8.13: التحكم بدارة القيادة بواسطة Translator (مبدل)

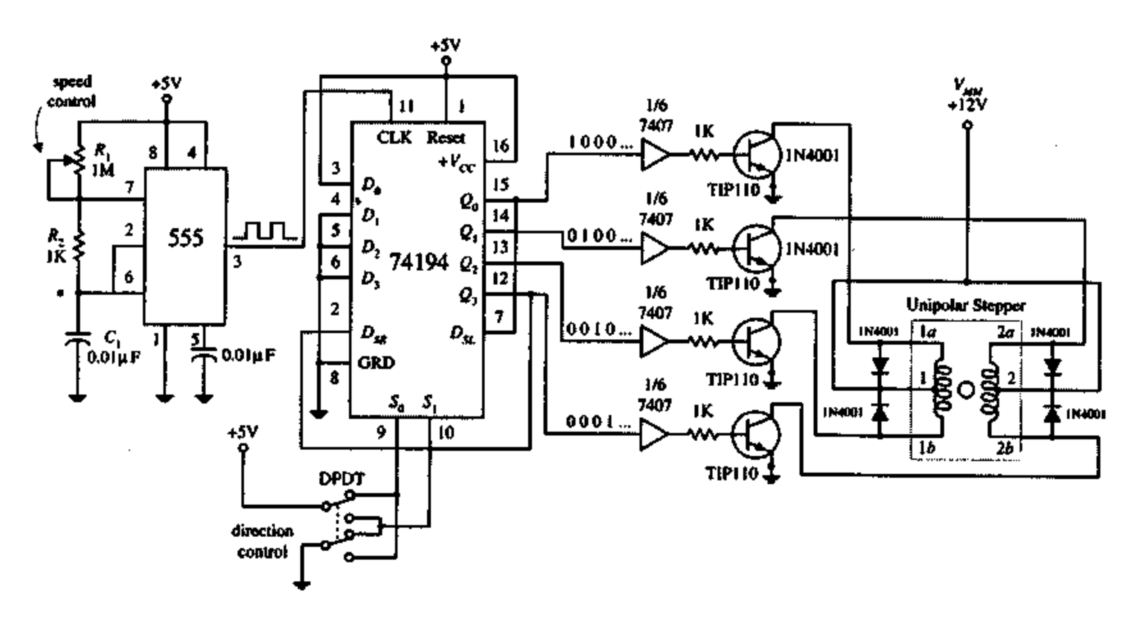
الـ Translator (المبدل) هو دارة تعطي نبضات التتابع التي تستخدم لقيادة دارة قيادة محرك الخطوة. والمبدل يمكن أن يكون في بعض الحالات دارة ربط قابلة للبرمجة (Programmable interface controller) أو حاسوباً (Computer)، مع برامج تولد نبضات الخرج اللازمة لقيادة أطراف دارة التحكم. وفي أغلب الحالات يكون المبدل دارة متكاملة خاصة تصمم لتأمين التتابع المناسب للتشغيل وذلك عند تطبيق نبضات clock على مدخله. يمكن أن يكون للمبدل دخل آخر للتحكم باتجاه التشغيل (جهة دوران المحرك). يوجد عدد من الدارات المتكاملة التي تستخدم كمبدلات (translators) لقيادة محركات الخطوة، وهذه الدارات سهلة الاستخدام وليست غالية الثمن، وستتعرف على واحدة من هذه الدارات بعد قليل، وسنبدأ أولاً بالتعرف على بعض دارات المبدلات البسيطة التي يمكن بناؤها من عناصر رقمية بسيطة.

يمكن توليد تشكيلة قيادة رباعية الطور باستخدام العداد العشري CMOS4017 (أو الدارة المتكاملة 74194 من عائلة TTL). يتم في هذه الدارة المتكاملة وبشكل متتابع جعل (1) من (10) مخارج في حالة (high)، وأما المخارج الباقية فتبقى في حالة Low وذلك طبعاً بعد تطبيق نبضات clock على الدارة. إذا تم وصل الخرج الخامس (Q_4) إلى الأرض يتحول العداد العشري إلى عداد رباعي (quad Counter). تطبق نبضات clock على دخل الدارة المتكاملة كما في الشكل (13-11) كي تصبح نبضات الخرج جاهزة لقيادة مرحلة قيادة المحرك الخطوي. يمكن تصميم دارة مبدل (translator) تؤمن تحكماً خطوياً استطاعياً وتحكماً بالاتجاه باستخدام الدارة المتكاملة CMOS 4027، وهي عبارة عن دارة تحوي قلابين من نوع JK (يمكن كذلك استخدام الدارة 7476 من عائلة TTL). تستخدم دارة البوابات المنطقية CMOS4070 (أو 7486 أيضاً بوابات XOR من عائلة TTL) لتأمين التحكم باتجاه الدوران.



الشكل (11.13): استخدام العداد العشري 4017 لتوليد تتابع قيادة محرك سيرفو، دارة تحكم خطوي وتحكم بالاتجاه باستخدام الدارة المتكاملة 4027.

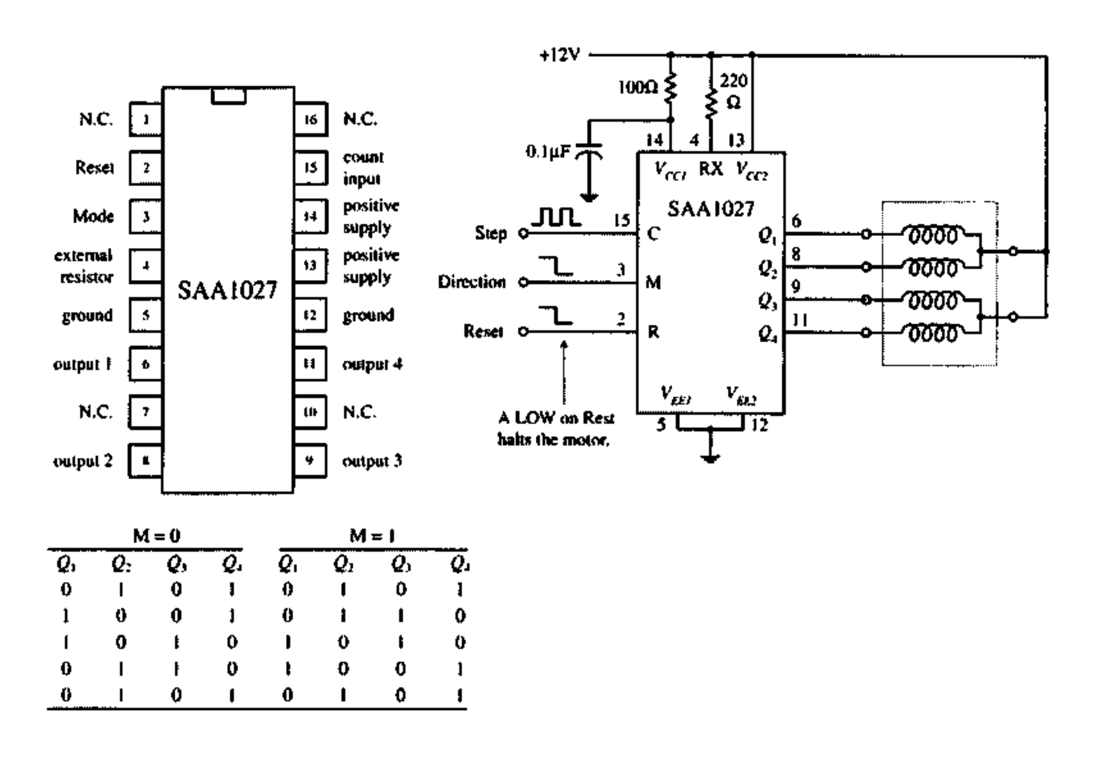
يبين الشكل (13-12) دارة تحتوي على المبدل (translator)، ودارة القائد (driver) ومحرك الخطوة. المحرك الخطوي الموجود في الدارة هو محرك وحيد القطبية، أما المبدل فهو عبارة عن عداد إزاحة TTL74194. تؤمن دارة (555) نبضات clock للدارة المتكاملة 74194، ويستخدم المفتاح DPDT للتحكم باتجاه دوران المحرك. تتعلق سرعة المحرك بتردد نبضات clock والتي تتعلق بدورها بقيمة المقاومة (R_1). يمكن استخدام المبدل في هذه الدارة للتحكم بمحرك خطوي من نوع الممانعة المغناطيسية المتغيرة، حيث يمكن ببساطة استخدام دارة القيادة المعطاة في الشكل (13-9) وتتابع التشغيل المبين في الشكل (13-8) كأدلة عمل.



الشكل (12.13): دارة كاملة لقيادة محرك خطوة.

ربما تكون أفضل دارة لقيادة محرك الخطوة هي واحدة من الدارات المتكاملة الجاهزة المصممة خصيصاً لهذا الغرض. توجد العديد من الشركات الصانعة التي تطرح دارات متكاملة جاهزة لقيادة محركات الخطوة وتحوي هذه الدارات على كلٍ من القائد (Driver) والمبدل (translator) في غلاف واحد. وعادة ما تكون هذه الدارات المتكاملة سهلة الاستخدام وليست غالية الثمن.

تعتبر الدارة المتكاملة SAA1027 دارة تقليدية تقدمها شركة فيليبس Philips لقيادة محركات الخطوة، وهي متكاملة ثنائية القطبية مصممة لقيادة محركات الخطوة رباعية الطور وتتكون من عداد ثنائي الاتجاه رباعي الحالة ومبدل شيفرة (Code Converter) وتستخدم لقيادة أربعة مخارج بشكل متعاقب. تمتاز هذه الدارة المتكاملة بممانعة مداخل عالية للضجيج وبإمكانية القيادة باتجاه عقارب الساعة وبعكس عقارب الساعة، بالإضافة إلى وجود مدخل تحكم بالتصفير وتيار خرج عالٍ وحماية لجهد الخرج. يتراوح جهد تغذية هذه الدارة بين (9.5) و(18V) وتتقبل جهود (7.5V) كحد أدنى وتعتبرها high أو (1)، أما القيمة العظمى للجهد الذي تعتبره Low أو (0) فهي (4.5V). تيار خرجها الأعظمي 500mA وتُعطى في الشكل (13-13) معلومات إضافية عن هذه الدارة المتكاملة.



M = 0				M = 1			
Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
0	1	0	1	0	1	0	1
1	0	0	1	0	1	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	1	0	0	1
0	1	0	1	0	1	0	1

الشكل (13.13): الدارة المتكاملة SAA1027.

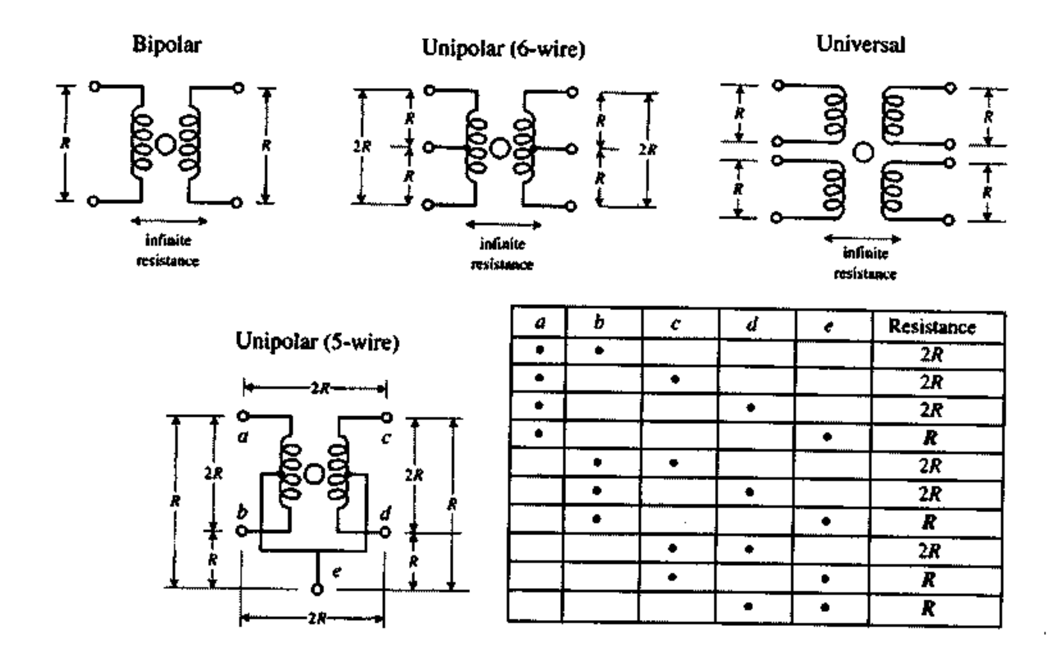
- **Count input C**: مدخل العد (C)– الرجل (15). عند حدوث انتقال من Low إلى high على هذا المدخل يغير الخرج حالته.
- **Mode input M**: مدخل النمط M– الرجل 3، يتحكم هذا المدخل باتجاه المحرك. انظر الجدول الموجود في الشكل (13-3).
- **Reset input R**: مدخل التصفير R –الرجل 2. عند تطبيق (0) على هذا المدخل يتم تصفير العداد. يأخذ الخرج المستويات المبينة في السطرين العلوي والسفلي من الجدول.
- **External resistor RX**: المقاومة الخارجية Rx (الرجل 4). توصل مقاومة خارجية إلى الطرف Rx وتحدد هذه المقاومة تيار القاعدة لترانزستور القيادة وتتعلق قيمة هذه المقاومة بتيار الخرج المطلوب.

- **Output Q2 Through Q4**: المخارج Q1 حتى Q4 (الأرجل 6، 8، 9 و11) –أطراف الخرج التي توصل مع المحرك الخطوي (Stepper).

وكما ذكرنا سابقاً فإن الدارة المتكاملة SAA1027 هي دارة تقليدية وتتوفر دارات أحدث وأفضل منها من شركات صانعة متعددة. إذا كنت مهتماً بتعلم المزيد عن هذه الدارات المتكاملة حاول البحث في الإنترنت وسوف تجد عدداً من المواقع المفيدة التي تناقش الدارات المتكاملة ICs التي تستخدم في قيادة محركات الخطوة. تعطيك مواقع الإنترنت أيضا عناوين الشركات الصانعة لدارات قيادة المحركات الخطوية وعناوين موزعيها.

9.13: كلمة أخيرة عن تحديد هوية محركات الخطوة

نقدم لك فيما يلي الاقتراحات التالية لتحديد مميزات محرك خطوي غير معروف: إن الأغلبية الساحقة من محركات الخطوة المتوفرة في الأسواق هي من الأنواع وحيد القطبية، ثنائي القطبية، والمحرك العمومي، واعتماداً على ذلك، إذا كان المحرك الموجود لديك له أربعة أطراف فإنه من النوع وحيد القطبية مع فرعة وسطى مشتركة. أما إذا كان عدد أطراف المحرك ستة فربما يكون المحرك من النوع وحيد القطبية بفرعات وسطى منفصلة. يمكن وبشكل عام اعتبار المحرك الذي له ثمانية أطراف محركاً عمومياً. إذا كان لديك شك بأن المحرك الموجود لديك من النوع ذي الممانعة المغناطيسية المتغيرة حاول تدوير الجذع فإذا دار الجذع بحرية فهو على الأغلب من نوع الممانعة المغناطيسية المتغيرة، أما إذا شعرت بمقاومة دوران شبيهة بالمسنن فإن المحرك يكون من نوع المغناطيس الدائم. بعد أن تحدد نوع المحرك الذي لديك عليك أن تحدد وظائف الأطراف، ويمكن تحديد الوظائف باستخدام مقياس أوم.



a	b	c	d	e	Resistance
•	•				2R
•		•			2R
•			•		2R
•				•	R
	•	•			2R
	•		•		2R
	•			•	R
		•	•		2R
		•		•	R
			•	•	R

الشكل (14.13): تحديد أقطاب محرك خطوة بقياس المقاومات.

إن كشف وظائف أرجل المحرك الخطوي أمر سهل، ويتم ذلك بواسطة مقياس أوم لتحديد زوج الأطراف الذي يعطي مقاومة منخفضة، لأن المقاومة المنخفضة تدل على أن السلكين هما نهايتان لنفس الملف. أما إذا كان الطرفان ليسا نهايتي ملف واحد فإن المقاومة بينهما تكون لا نهائية. يمكن كشف أطراف المحرك العمومي باستخدام نفس الطريقة. يتم عند

كشف أطراف محرك خطوي وحيد القطبية بستة أطراف فصل هذه الأسلاك إلى مجموعتين، تتكون كل مجموعة من ثلاثة أزواج. وبعد ذلك يتم تحديد الطرف المشترك حيث يتم قياس المقاومة بين أزواج الأسلاك ويُحدد الزوج الذي تكون مقاومته (R) والأزواج التي مقاومتها (2R)، انظر الشكل (13-14).

إنّ تحديد أطراف محرك وحيد القطبية بخمسة أسلاك (بفرعة وسطى مشتركة) أكثر صعوبة مما سبق بسبب الخط المشترك (أو الفرعة المشتركة المخفية). يمكن الاستفادة من المخطط والجدول المبين في الشكل (13-14) تحدد النقاط المعطاة في الجدول أماكن وصل مجسات مقياس الأوم، وبمساعدة هذا الجدول يتم عزل الطرف (e)، السلك المركزي المشترك، بملاحظة قراءة مقياس الأوم فعندما يُعطى قيمة (R) تكون (e) هي أحد السلكين الموصولين مع مقياس الأوم، ثم تحدد أياً من السلكين هو (e) باختبار المقاومة بين كل من هذين السلكين وباقي الأسلاك، فإذا حصلت دوماً على (R) فإنك تمسك السلك (e) أما إذا كنت تحصل دوماً على قراءات (2R) فإنك لا تمسك السلك (e) وأفضل طريقة لمتابعة تمييز الأرجل هي وصل المحرك إلى دارة القيادة ومراقبة العمل، فإذا دار المحرك بخطوات انتهى الأمر، وإلا عليك المحاولة ثانية بالتجريب والتبديل بين الأسلاك حتى يدور المحرك.





اعتبارات عملية تطبيقية

1.14: الأمان

إن جسم الإنسان نظام معقد يتم التحكم به بواسطة إشارات كهروكيميائية يتم إرسالها من الدماغ، وإذا تم حجب هذه الإشارات بسبب التيار الكهربائي، فإن الأعضاء الحيوية يمكن أن تتوقف عن العمل بالشكل المناسب، وقد يقود ذلك إلى الموت. إذا مر تيار قدره (1mA) عبر جسم الإنسان، يشعر الإنسان بإحساس يشبه الوخز الخفيف أو بشعور لطيف، أما إذا كان التيار المار عبر الجسم مساوياً (10mA)، فإن هذا التيار يسبب صدمة بشدة كافية تحدث فقداناً لا طوعياً للتحكم بالعضلات. إذا كان التيار أكبر من (100mA) واستمر مروره لفترة تزيد عن ثانية واحدة فإنه يمكن أن يؤدي إلى آثار ضارة جداً وقد ينتج عنه الموت. تسبب التيارات التي تزيد عن (100mA) عدم انتظام في دقات القلب ويمكن أن تؤدي إلى الموت. تتراوح مقاومة جسم الإنسان للتيار الكهربائي بين (1MΩ) عندما يكون الجسم جافاً (dry) وبضعة مئات من الأومات عندما يكون الجسم رطباً ويحسب التيار المار عبر الجسم عند وصل الجسم مع منبع جهد من قانون أوم:

$$I = \frac{V}{R_{body}}$$

لنفترض أنك وصلت سلكاً من يدك اليمنى وسلكاً من رجلك اليسرى ووصلت هذه الأسلاك مع بطارية 6V. إذا كانت مقاومة جسمك (300000Ω أو 300kΩ)، فإن التيار الذي سيمر عبر جسمك سيكون:

$$I = \frac{6}{300000} = 20nA$$

هذا التيار صغير جداً وهو ضمن حدود الأمان وربما لا تشعر به نهائياً، ولكن تصور أنك -لا سمح الله- تعرضت وأنت في الحمام للجهد 120 فولت، عندها سيكون جسمك رطباً ومقاومته لا تزيد عن 1000Ω وبالتالي فإن التيار الذي يمر عبره سيكون:

$$I = \frac{120V}{1000\Omega} = 0.12A = 120mA$$

وهذا التيار خطير على حياة الإنسان. في أغلب دول العالم يكون جهد شبكة المدينة 220V فإذا تعرض جسدك لهذا الجهد وكان رطباً فإن التيار الذي يمر فيه سيكون:

$$I = \frac{220}{1000} = 0.22A = 220mA$$

والخطورة هنا أكبر من حالة الجهد 120V. ربما تسمع من الناس أن الجهد ليس هو الذي يقتل وإنما التيار، ولكن ومن قانون أوم تلاحظ أن قيمة الجهد هي التي تحدد التيار الذي يمر في الجسم وبالتالي فإن الجهد والتيار معاً هما مصدر الخطر على حياة الإنسان. ومن الضروري والهام هنا أن ننبه إلى أن مقاومة جسم الإنسان تختلف من شخص لآخر وتختلف حسب كميات السوائل والأملاح الموجودة في الجسم وأنواعها.

إذن يلعب الجهد والتيار دوراً متساوياً في الخطورة على حياة الإنسان. من الضروري أن نفهم ماذا يُقصد بالجهد (voltage) لأننا نستخدمه وفق قانون أوم لحساب التيار. كما رأيت عند دراسة المبادئ النظرية، يُعرَّف مصدر الجهد المثالي بأنه المصدر الذي يُعطي في خرجه جهداً ثابتاً مهما كان الحمل الموصول معه. أي أن المصدر الجهدي المثالي يمكنه إعطاء تيار متغير إلى الحمل، وإذا اعتبرت كافة مصادر الجهد كمصادر مثالية عندها يمكنك القول إن الذي يقتل الإنسان هو التيار. لا توجد في الحياة العملية مصادر جهد مثالية، أي أن مصادر الجهد الفعلية قادرة على تزويد الحمل بتيار أعظمي محدود، وفي هذه الحالات لا يمكن تطبيق قانون أوم بشكل أعمى، ويمكن توضيح ذلك من خلال المثال التالي:

عندما تقوم بتسريح شعرك يمكن أن ينتقل حتى (10^{10}) إلكترون من شعرك إلى المشط وينتج عن ذلك جهد يساوي 2000V بالنسبة للأرض. إذا طبقت قانون أوم وبفرض أن مقاومة الجسم تساوي 10kΩ فإن التيار المار افتراضياً سيكون (0.2A) وهذا التيار قاتل!! توقف لحظة. هل سمعت أن إنساناً قد مات بصدمة كهربائية ناتجة عن الكهرباء الساكنة؟

بالتأكيد لا، وبالتالي لا يمكن هنا تطبيق قانون أوم لحساب التيار المار عبر الجسم والسبب في ذلك هو أن الجهد المتشكل ليس مصدر جهد مثالياً والشحنات التي سوف تشكل التيار تتفرغ بسرعة، ويمكن إجراء حساب تقريبي بسيط، فإذا كان عدد الإلكترونات على المشط هو (10^{10}) إلكترون، وشحنة الإلكترون الواحد هي ($1.6\times10^{-9}C$). من تعريف التيار لدينا:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t};\ \Delta Q = (1.6\times10^{-9})C$$

لنفرض أن ($I = 0.2A$)، نحل المعادلة بالنسبة لـ Δt فنجد أن ($\Delta t = 8\times10^{-9}s$) أي فقط (8ns) والتعرض لهذا التيار لمدة وجيزة جداً لا يؤدي إلى أية أضرار، ولكن الوضع لن يكون كذلك إذا لامست شوكة مثلاً موصولة مع مأخذ الجهد المتناوب لأن جسدك سيمرر تياراً دائماً يحرق أنسجة جسدك. يوجد شرح أكثر بديهية للعبارة "ليس الجهد الذي يقتل وإنما التيار" من خلال المقارنة التالية. تصور إلقاء حفنة رمل من نافذة في الطابق الثاني مثلاً على رجل يمر في الشارع. إذا سقطت حبات الرمل على رأس الرجل سيشعر بها وقد يشعر بألم خفيف ولكن الألم والضرر يزداد إذا سقطت حفنة الرمل من نافذة في الطابق العاشر مثلاً، ولكن الأمر يختلف كثيراً إذا سقطت صرة رمل فوق رأس الرجل، حبات الرمل تشبه الإلكترونات (التي تشكل التيار) وارتفاع مكان السقوط يشبه شدة الجهد الكهربائي فالخطورة تزداد بزيادة التيار وزيادة الجهد والشخص المار الذي يتضرر من سقوط الرمل عليه يشبه أعضاء جسم الإنسان التي تتضرر من التيار والجهد الكهربائي.

1.1.14: بعض الإرشادات حول موضوع الأمان

إن الإرشادات والتوجيهات التالية تجنبك خطر التعرض للصدمات الكهربائية:

- تأكد من أن كافة العناصر الموصولة مع خطوط الجهد الكهربائي المتناوب (جهد شبكة المدينة) تحقق متطلبات الاستطاعة المطلوبة.
- استخدام يداً واحدة عند إجراء قياسات كهربائية، أما يدك الأخرى فأبقها إلى جانب جسمك أو ضعها في جيبك، فإذا تعرضت لصدمة، فإن احتمال مرور التيار عبر قلبك سيكون أقل.
- عند تصنيع وتجميع مصادر تغذية أو أية أجهزة كهربائية أخرى تأكد من وضع كافة العناصر والأسلاك ضمن صندوق بلاستيكي عازل أو معدني، وعند استخدام صندوق معدني من الضروري تأريض الصندوق بوصله مع خط التأريض (ground wire) في المأخذ الكهربائي. إن تأريض الجسم المعدني للصندوق يجنبك الصدمات الكهربائية عند سقوط الناقل الساخن (hot wire) على جسم الصندوق وملامسته له.
- عند فتح ثقوب في الغلاف المعدني لتمرير ناقل كهربائي عبرها من الضروري وضع عازل مطاطي على محيط الثقب الداخلي كي لا تترك احتمالاً لإزالة عازل السلك عند احتكاكه بالجسم المعدني.

- لا تحاول إصلاح الدارات والأجهزة الكهربائية والإلكترونية وهي موصولة إلى التغذية. افصل التغذية الكهربائية أولاً ثم ابدأ بالإصلاح.
- انتبه لدارات المرشحات الكبيرة، ومضاعفات أو ضاربات الجهد ومكثفات تخزين القدرة، فهذه العناصر قد تخزن مقداراً مميتاً من الشحنة ويمكن أن تحتفظ بهذه الشحنة لبضعة أيام. وحتى المكثفات ذات الجهود (5V) أو (10V) يمكن أن تكون خطيرة. لا تلمس طرفي مكثف في نفس الوقت وقبل التعامل مع المكثفات فرِّغ المكثف بوصل طرفيه مع بعضهما برأس مفك براغي قبضته معزولة.
- عند التعامل مع أجهزة ودارات تغذى من جهد شبكة المدينة ينصح بانتعال حذاء ذي أرضية مطاطية أو الوقوف على أرضية مطاطية أو خشبية، لأن ذلك يقلل من احتمال التعرض للصدمات.
- تجنب وضع نفسك في موقف خطر كهربائياً وخاصة عندما تفقد التحكم بعضلاتك، فإذا تعرضت لصدمة كهربائية وكنت وحيداً فقد يكون ذلك أخطر من الصدمة ذاتها.
- عندما تتعامل مع دارات عالية الاستطاعة، يجب أن يكون معك أحد لمساعدتك إذا حدث أي خلل. وإذا رأيت أحداً يمس خط التغذية الكهربائي ولا يستطيع التخلص منه، لا تلمسه، وحاول بالسرعة الممكنة فصل التغذية إذا استطعت وإذا لم تتمكن استخدم أداة أو وسيلة عازلة لتحرير الإنسان أو الشخص من مصدر الجهد الكهربائي ومن الضروري أن يلم الإنسان بأصول تقديم الإسعافات الأولية الضرورية للمصاب بالصدمة الكهربائية.
- يجب أن تكون كوابل تغذية كافة أجهزة الاختبار والقياس (كمولدات الإشارة وراسم الإشارة) ذات ثلاثة أسلاك (كبل بثلاثة نواقل)، أحدها يوصل مع جسم الجهاز ومع خط التأريض. من المفيد استخدام محول عزل لتغذية الأجهزة الكهربائية لتقليل خطر الصدمات الكهربائية إلى الحد الأدنى.
- استخدم أسلاكاً ومجسات معزولة عند اختبار الدارات الكهربائية وانتبه كي لا تلامس أصابعك رأس المجس غير المعزول عند ملامسته للناقل الساخن (hot) في الدارة، وعند إجراء توصيلات في الدارة يفضل فصل التغذية عنها.

2.1.14: تخريب العناصر بالتفريغ الكهربائي الساكن

عندما يمشي إنسان على سجادة وهو ينتعل حذاءً خفيفاً مخصصاً للبيت، فإن إلكترونات تنتقل من السجادة إلى جسم الإنسان ويمكن أن يصبح جهد الجسم بالنسبة للأرض حتى (1000V)، كما أن التعامل مع حقيبة من البولي إيتلين (polyethylene bag) يمكن أن يؤدي إلى شحن الجسم إلى درجة تجعل جهده حوالي (300V)، أما تسريح الشعر فإنه يمكن أن يجعل جهد الجسم بالنسبة الأرض حوالي (2500V). إن التفريغ الكهربائي الساكن لهذه الشحنات لا يشكل خطورة على جسم الإنسان ولكن الحال يتغير عندما تتعرض بعض العناصر نصف الناقلة لمثل هذا التفريغ، والعناصر التي تتضرر بشكل خاص من هذا التفريغ هي الترانزستورات الحقلية، كترانزستورات MOSFETs وJFETs. في ترانزستورات MOSFET تكون طبقة الأوكسيد العازلة بين البوابة والقنال رقيقة ويمكن أن تدمَّر هذه الطبقة عند لمس جسم مشحون لطرف البوابة، لأن جهد الانهيار بين البوابة والقنال يتم تجاوزه.

وينتج عن ذلك ثقب عبر العازل ويتخرب الترانزستور، وفيما يلي نتعرف على درجات الخطورة على العناصر الحساسة للتفريغ الكهربائي الساكن.

- العناصر عالية الحساسية (extremely vulnerable) هي ترانزستورات MOS، الدارات المتكاملة MOS، الترانزستورات الحقلية (Junction FETs)، الترانزستورات الميكروية (microware transistors)، ومقاومات الغشاء المعدني (metal film resistors).
- العناصر متوسطة الحساسية وتشمل دارات CMOS المتكاملة، دارات TTL من عائلة LS الفرعية، ودارات TTL المتكاملة من عائلة شوتكي، وديودات شوتكي والدارات المتكاملة الخطية.

- العناصر ضعيفة الحساسية، وتشمل دارات TTL المتكاملة، وديودات الإشارات الصغيرة، والترانزستورات، والكريستالات الكهروضغطية.
- العناصر عديمة التأثر: وهي المكثفات، والمقاومات المكونة من خلائط كربونية، والملفات والعديد من العناصر التشابهية الأخرى.

يوضع تحذير على العناصر عالية الحساسية للتفريغ الكهربائي الساكن وينص التحذير على أن العنصر عرضة للتعطل بسبب الكهرباء الساكنة "Caution, Components subject to damage by Static electricity".

وعندما ترى هذا التحذير اتبع إجراءات الحيطة التالية.

3.1.14: تدابير الحيطة

- خزِّن العناصر بأغلفتها الأصلية، في وعاء ناقل كهربائياً (مثل ورق الألمنيوم، أو صفائح معدنية) أو ضمن غلاف مطلي بمادة ناقلة.
- لا تلمس أطراف العناصر عالية الحساسية للتفريغ الكهربائي الساكن.
- فرِّغ الشحنة عن جسمك قبل لمس العناصر بملامسة سطح معدني مؤرض كأنبوب ماء مثلاً أو أداة كبيرة.
- احذر ملامسة ثيابك للعناصر.
- أرض كاويات اللحام والطاولة (أو استخدم كاوي لحام مغذى من بطارية) ويجب أن تؤرض جسمك بوضع سوار محكم حول معصمك وصله مع الأرض بناقل.
- لا تفك أو تركب عنصراً عالي الحساسية للتفريغ الكهربائي الساكن في دارة عندما تكون مغذاة. عندما يكون العنصر مركباً في الدارة ينخفض احتمال تضرره بسبب التفريغ الكهربائي الساكن كثيراً.

2.14: تركيب الدارات

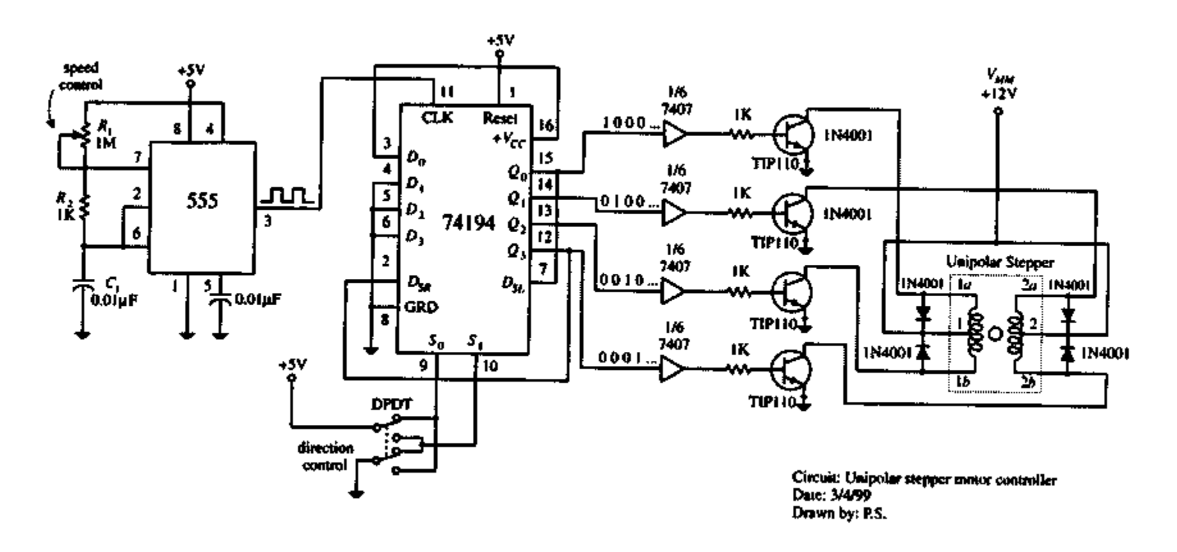
ستتعرف في هذه الفقرة على الخطوات اللازمة لبناء دارة، وتشمل هذه الخطوات رسم المخطط الكهربائي للدارة، وبناء نموذج أولي للدارة، وتكوين دارة مؤقتة، وإيجاد علبة مناسبة للدارة، وتطبيق مجموعة من خطوات كشف الأعطال على الدارة من أجل إصلاح الدارات التي تعمل بشكل غير مناسب.

1.2.14: رسم مخطط دارة

إن مخطط الدارة هو مخطط تفصيلي لها، وكي يكون المخطط مفيداً يجب أن يحوي كل المعلومات الضرورية بحيث أن أي شخص يقرأ المخطط يكون قادراً على تحديد العناصر التي يجب شراؤها، وكيفية وصل هذه العناصر مع بعضها وكذلك نوع إشارة أو إشارات الخرج المتوقعة. يجب اتباع التوجيهات التالية لإعداد مخطط دارة بدون أي غموض.

- يتم وفق التقليد المعياري المتبع وضع طرف الدخل في اليسار وطرف الخرج في اليمين وموجب جهد التغذية في الأعلى وسالب جهد التغذية في الأسفل.
- تُرسم المجموعات الوظيفية ضمن المخطط غير متداخلة مع بعضها، كالمضخمات، ومراحل الدخل، والمرشحات وغيرها، وذلك لأن فصل هذه المراحل ضمن المخطط يسهل عزل المشاكل خلال مرحلة الاختبار.
- تُعطى كافة عناصر الدارة رموزاً توضيحية (مثل R_1، C_3، Q_1 وIC_4)، وتعطى القيمة الدقيقة للعنصر (مثلاً 100kΩ، 0.1µF، 2N2222، 741)، كما تُعطى أحياناً معدلات الاستطاعة لبعض العناصر كالمقاومات والحواكم والمجهرات (Speakers).

- تستخدم الاختصارات بدلاً من قيم العناصر الكبيرة مثل 100kΩ بدلاً من 100000Ω و100pF بدلاً من (100×10^{-12}F)، وعادة ترمز p للبيكو ويساوي (10^{-12}) وn للنانو ويساوي (10^{-9}) وµ للميكرو ويساوي 10^{-6} وk للكيلو ويساوي (10^{3}) وM للميغا ويساوي (10^{6}).
- توضع أرقام أرجل الدارة المتكاملة من الخارج (خارج رمز الدارة)، أما اسم الدارة ورقمها فيوضعان ضمن الرمز.
- عندما يكون شكل الإشارة مهماً ومفيداً في عمليات الاختبار يوضع شكل الإشارة في الموقع أو النقطة المناسبة، وبالتأكيد تساعد أشكال الإشارات كثيراً في عمليات الاختبار والإصلاح.
- لا تُرسم خطوط التغذية للمضخمات العملياتية وكذلك الأمر بالنسبة للدارات المتكاملة، ولكن إذا خشيت من حدوث إشكال أو تعارض فيما بعد فمن الأفضل رسم خطوط التغذية.
- توضع نقطة على شكل دائرة معماة للدلالة على نقاط تقاطع الأسلاك، أما الأسلاك غير المتصلة مع بعضها فإنها ترسم متصالبة ولا توضع نقطة في مكان التصالب.
- يوضع مستطيل عنوان في أسفل الصفحة التي تحوي الدارة ويكتب فيه اسم المصمم والتاريخ ويترك فيه فراغ للمراجعات.



الشكل (1.14): نموذج لمخطط دارة كهربائية.

بعد الانتهاء من رسم الدارة، يتم التأكد من عدم وجود نواقص في التوصيلات وقيم عناصر الدارة. يتم كذلك التأكد من وضع معدلات الاستطاعة للعناصر عندما يكون ذلك ضرورياً، كما يتم التأكد من صحة التوصيلات ومن أن التوصيلات قد رُسمت بأبسط شكل ممكن، لأن كشف الأخطاء في مرحلة الرسم ومسح عدة خطوط وإعادة رسمها أبسط وأقل ازعاجاً من إصلاح التوصيلات بعد تلحيم عناصر الدارة.

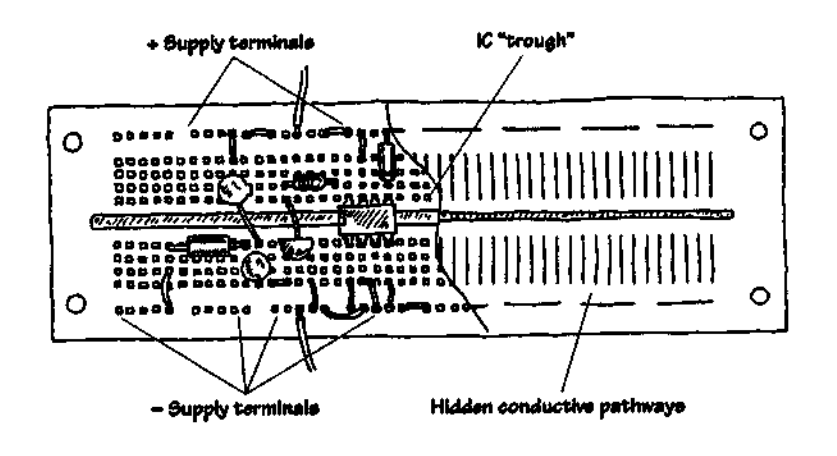
2.2.14: ملاحظة عن برامج محاكاة الدارات

يمكن استخدام أحد برامج محاكاة الدارات الإلكترونية لاختبار الدارة قبل تجميعها على لوحة اختبار، أو حتى قبل الانتهاء من رسم المخطط النهائي للدارة. يسمح برنامج المحاكاة بتكوين نموذج للدارة واختبار هذا النموذج (اختبار الجهود والتيارات، وأشكال الإشارات والمستويات المنطقية) دون لمس أية عناصر إلكترونية أو كهربائية حقيقية. يحوي برنامج المحاكاة النموذجي مكتبة للعناصر التشابهية والرقمية. إذا أردت مثلاً محاكاة دارة هزاز مكونة من عدة ترانزستورات ثنائية القطبية ومقاومات ومكثفات، فإن كل ما عليك فعله هو إحضار هذه العناصر من المكتبات ووصلها مع بعضها لتكوين

دارة الهزاز وتغذية هذا الهزاز من مصدر جهد تغذية. يتم اختبار أداء الدارة باستخدام أدوات الاختبار في النقاط المناسبة من الدارة، فمثلاً إذا أردت مراقبة شكل إشارة خرج الهزاز، استخدم راسم الإشارة الموجود في برنامج المحاكاة وأوصل مجساته مع خرج الهزاز، وعند تشغيل برنامج المحاكاة تتحول شاشة الـ Monitor في جهاز الحاسوب إلى شاشة تشبه راسم الإشارة تبين جهد الخرج كتابع للزمن. تحوي برامج المحاكاة أجهزة اختبار مثل مقاييس الجهد والتيار، محللات منطقية، مولدات إشارات وغيرها. ما الفائدة من برامج المحاكاة؟ عند إجراء محاكاة لدارة بواسطة برنامج محاكاة لا يوجد أي احتمال لأن يكون أحد العناصر معطلاً كما قد يحدث عند تجميع العناصر إذا كان التصميم غير صحيح وتم اختباره على لوحة تجريب فإن الاختبار قد يؤدي إلى تخريب بعض العناصر، وهذا مكلف مادياً وخاصة إذا كانت العناصر غالية الثمن كما أن برنامج المحاكاة ينجز كافة الحسابات الرياضية ويوفر عليك وقت إجراء هذه الحسابات. يتيح لك برنامج المحاكاة إمكانية تغيير قيم عناصر الدارة ومتابعة التجريب حتى تعمل الدارة بشكل جيد. يجعل استخدام برامج المحاكاة تعلم الإلكترونيات شيئاً ممتعاً وبديهياً ويوفر الكثير من الوقت اللازم للاختبار التجريبي المخبري. من أهم برامج المحاكاة المتوفرة برنامج workbench، وبرنامج Circuit Maker وبرنامج Microsim/PSpice. تعتبر برامج Workbench وCircuitMaker سهلة الاستخدام، أما برنامج PSPICE فاستخدامه أصعب لأنه أكثر تقنية. يمكن معرفة المزيد من التفصيلات عن هذه البرامج من الإنترنت.

3.2.14: تكوين نموذج أولي للدارة

بعد الانتهاء من رسم مخطط الدارة يجب إعداد وتنفيذ نموذج أولي لها، والأداة الأكثر استخداماً في تكوين النموذج الأولي هي لوحة تجميع العناصر (breadboard) التي لا تحتاج إلى لحامات، وتوضع العناصر كلها كالترانزستورات والمقاومات والمكثفات والدارات المتكاملة على لوحة التجريب والتجميع وتوصل العناصر مع بعضها إما بواسطة أسلاك أو بواسطة مسارات ناقلة داخلية موجودة في الطرف السفلي المخفي من اللوحة (انظر الشكل 14-2).



الشكل (2.14): لوحة تجميع عناصر.

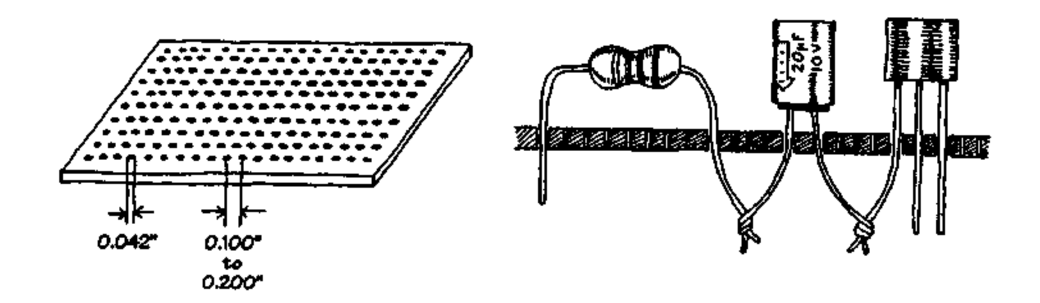
تتوفر لوحات اختبار لتجميع دارات إلكترونية بدون أية لحامات وتحوي هذه اللوحات مصفوفات من الثقوب الصغيرة، وعند وضع طرف عنصر أو سلك في أحد هذه الثقوب فإن ما يشبه الكم (Sleeve) يمسك بالسلك أو بطرف العنصر لأن هذا الكم عادة ما يكون من النوع النابضي الذي يثبت السلك في مكانه. تصمم أبعاد هذه الثقوب بحيث تناسب أسلاكاً من المعيار (22-gauge) ولكنه يمكن أن يتوسع ليقبل أسلاكاً بأبعاد (0.015) و(0.032) إنش، أو (0.38 و0.81mm). تحجز الصفوف العلوية والسفلية لتوصيلات التغذية وتحجز الثقوب الواقعة على طرفي الفجوة المركزية في اللوحة للدارات المتكاملة التي لها صفان متناظران من الأرجل (DIP ICs).

4.2.14: الدارة النهائية

بعد الانتهاء من تجريب الدارة الأولية يتم تصنيع الدارة النهائية، ومن أجل ذلك يجب اختيار نوع لوح تجميع العناصر، ويمكن اختيار لوحة مثقبة (Perforated board) أو اختيار لوحة توضع العناصر على أحد وجوهها وتلف أطراف العناصر مع بعضها من الوجه الآخر (Wire-wrap board). أو دارة مطبوعة عامة محضرة مسبقاً، أو دارة مطبوعة خاصة، وسنتعرف فيما يلي بشكل أكثر تفصيلاً على كل نوع من هذه اللوحات.

اللوح المثقب

اللوح المثقب هو لوح مصنوع من مادة عازلة وفيه مجموعة كبيرة (مصفوفة) من الثقوب (الشكل 14-3). يتم تركيب العناصر على الوجه العلوي للوح وتجدل الأطراف التي يجب وصلها مع بعضها من الوجه السفلي (ويمكن أن تلحم مع بعضها).



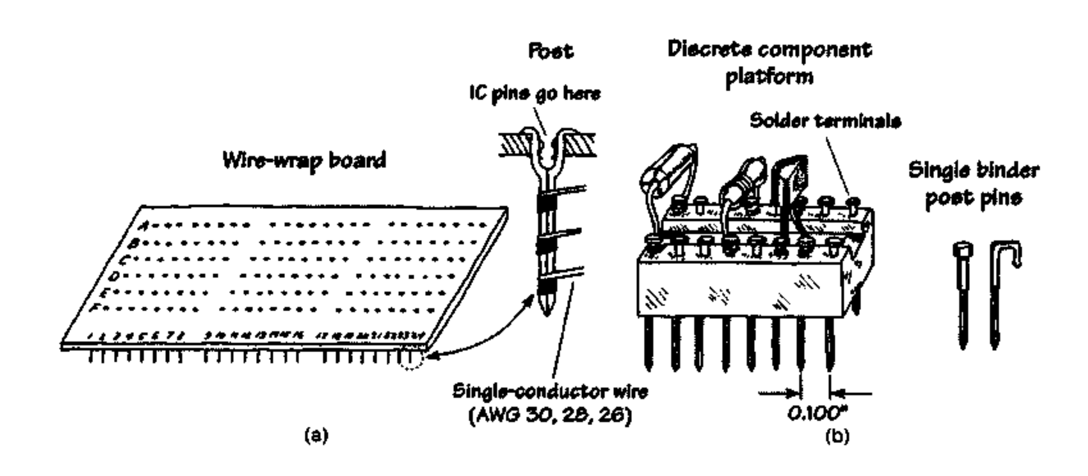
الشكل (3.14): اللوح المثقب وتوضع العناصر عليه.

إن تجميع الدارة باستخدام اللوح المثقب أمر سهل، ولا يحتاج تنفيذ التوصيلات إلى الكثير من المهارة، ولكن الدارة النهائية التي يتم الحصول عليها معرضة للتفكك بمرور الزمن وتلتقط الكثير من الضجيج (لأن أسلاك الوصل تعمل كهوائيات صغيرة). تستخدم الألواح المثقبة بشكل عام لتجميع الدارات البسيطة والتي لا تتطلب الدقة العالية.

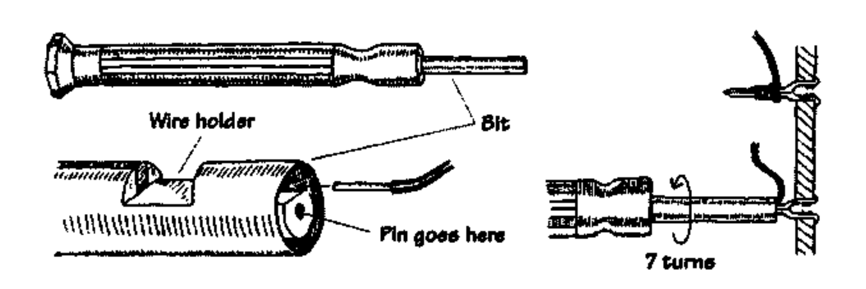
لف السلك (لوح لف، الأسلاك)

يعتبر استخدام لوح لف الأسلاك (wire-wrap board) أسرع طريقة لتجميع دارة متوسطة التعقيد تحوي دارات متكاملة ICs. يتكون لوح لف الأسلاك من مصفوفة ثقوب ناقلة وينتهي كل ثقب بما يشبه الإبرة التي تصدر من الوجه الآخر للوح (انظر الشكل 14-4).

يتم إدخال أرجل الدارات المتكاملة مباشرة في الثقوب الناقلة الموجودة في الطرف العلوي للوح، أما المقاومات والمكثفات والترانزستورات فيجب أن تُركب على قواعد خاصة لها شكل القوالب أو الأوتاد الدقيقة (انظر الشكل 14-b4). يحوي كل قالب عدداً من الرؤوس التي تشبه رؤوس المسامير، وتوصل أرجل (أطراف) العناصر المنفصلة مع هذه الرؤوس، إما بلف طرف العنصر حول الرأس المسماري أو بتثبيت طرف العنصر مع الرأس بواسطة اللحام. يتم إدخال الأرجل الدقيقة للقواعد في الثقوب الناقلة الموجودة على السطح العلوي للوح. توصل أرجل العناصر مع بعضها من الوجه السفلي للوح بواسطة أسلاك (وعادة ما تكون الأسلاك من المعيار 30، أو 28 أو 26). تستخدم لفافة أسلاك خاصة لتثبيت الأسلاك الموصولة مع بعضها بشكل جيد (انظر الشكل 14-5) ويتم بواسطة هذه الأداة لف أسلاك التوصيل حول إبرة التوصيل بواسطة جزء دوار يدور حول أنبوبة مفرغة. يتم إدخال السلك في الأداة وتوضع النواة حول إبرة التوصيل ويدور القسم الدوار فيلف السلك حول الإبرة عدة لفات (حوالي سبع لفات).



الشكل (4.14): لوح لف أسلاك لتجميع الدارات.

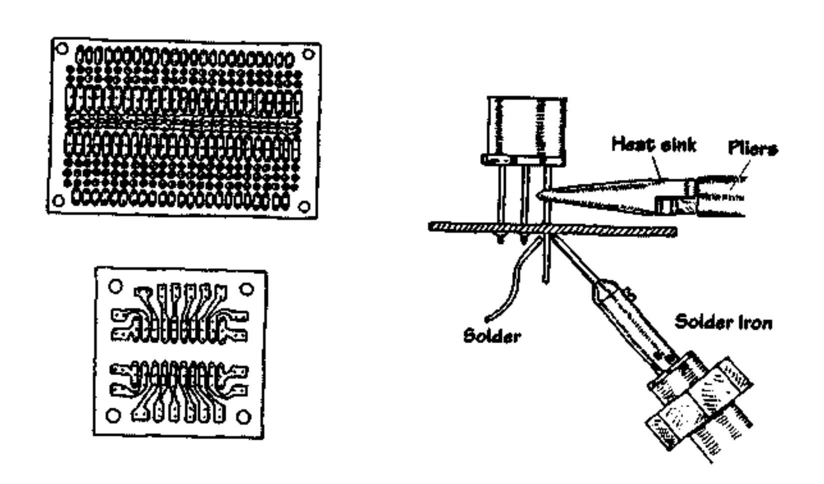


الشكل (5.14): أداة لف الأسلاك.

يفضل إجراء عمليات لف الأسلاك في مسار منفرد (وحيد) وذلك لتوفير الوقت وتجنب حدوث الأخطاء، وبعد الانتهاء من المسار الأول يتم الانتقال إلى المسار الثاني. يُلاحظ في الشكل (a4-14) أن الإبر على الوجه السفلي للوح تعطى ترقيماً أفقياً وعمودياً ولذلك يكون لكل إبرة رمز متبوع برقم مثل C2، وE7. قبل إجراء التوصيلات يُنصح بوضع جدول توصيل بعد رسم شكل للوح التوصيل ورسم كافة العناصر عليه، وبعد الانتهاء من الجدول والتأكد من صحة التوصيلات يمكن إنجاز التوصيلات. تعتبر ألواح أسلاك اللف مناسبة لتجميع دارات تحوي دارات متكاملة ICs. ولكن هذه الألواح غير مصممة أصلاً للعناصر المنفصلة لذلك يجب استخدام قواعد خاصة لهذه العناصر. يمكن في حال وجود عدد كبير من العناصر المنفصلة في الدارة استخدام دارة مطبوعة (Preetched) محضرة مسبقاً أو تصنيع دارة مطبوعة خاصة بدارتك.

الواح الدارات المطبوعة المثقبة والمحضرة مسبقاً

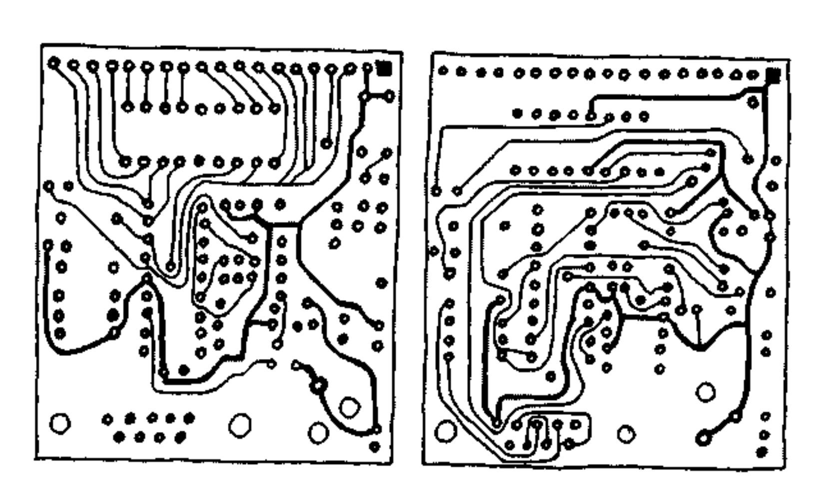
يُصنع لوح الدارة المطبوعة المثقبة والمحضرة مسبقاً للاستخدامات العامة من مادة عازلة وعلى أحد وجوهها تشكيلة مناسبة من الخطوط النحاسية وعدد من الثقوب ويتم تركيب العناصر على هذا اللوح ببساطة بإدخال أرجل العنصر في الثقوب (يوضع العنصر على الوجه الذي لا يحوي خطوطاً نحاسية) ثم يتم تلحيم الأرجل بواسطة كاوي لحام. تتوفر هذه الألواح بتشكيلات مختلفة من الثقوب، ويبين الشكل (6-14) نماذج من هذه الألواح.



الشكل (6.14): بعض نماذج ألواح دارات مطبوعة مصممة للاستخدامات العامة.

الألواح المصنعة حسب الرغبة (حسب الطلب)- ألواح الدارات المطبوعة

إذا كنت ترغب في تصنيع دارة تشبه دارات المحترفين، فإن السبيل إلى ذلك هو تصميم دارة مطبوعة خاصة بها، ثم تنفيذ هذه الدارة على لوح من الفيبر العازل المغطى (وجه واحد أو وجهان بالنحاس)، ويحتاج تصنيع هذه الدارة إلى استخدام تقنيات الرسم وأدوات ومعالجات كيميائية لتحويل اللوح المغطى بالنحاس إلى الدارة المطبوعة المناسبة (انظر الشكل 14-7)، وبعد أن تصبح الدارة المطبوعة جاهزة لا تحتاج لإنجاز التوصيلات إلا لعدد قليل جداً من الأسلاك الخارجية.



الشكل (7.14): وجهان علوي وسفلي لدارة مطبوعة.

إن تصميم الدارة المطبوعة الخاصة وتنفيذها يحتاج إلى زمن، ولكن هذا الزمن لا يذهب هباءً لأنه يوفر عليك الكثير من التوصيلات الخارجية عند تجميع الدارة. توجد حالات لابد فيها من تصنيع دارة مطبوعة خاصة للتأكد من صحة عمل الدارة، وخاصة إذا كانت الدارة تحوي عناصر يتأثر أداؤها بأطوال أسلاك التوصيل، فعلى سبيل المثال تتطلب الدارات المتكاملة من عائلة ECL دارات مطبوعة فريدة تشبه الدارات التي تصنع بطريقة الشريحة الميكروية، كما تتطلب تباعداً دقيقاً بين العناصر من أجل الحصول على أزمنة صعود وهبوط سريعة ولتجنب حدوث التشويش المتبادل بين عناصر الدارة. يستفاد من خطوط التوصيل على الدارات المطبوعة في المضخمات عالية الحساسية فكلما كان خط الوصل قصيراً ومستقيماً كان الضجيج الملتقط أقل.

يلزم لتصنيع الدارة المطبوعة الخاصة لوح عازل (سماكته عادة 1/16in) مصنوع من نسيج زجاجي (fibreglass) مقاوم للاحتراق ومطلي على وجه أو وجهين بطلاء نحاسي رقيق جداً. يتم تحويل الدارة الكهربائية إلى خطوط توصيل بين العناصر ويراعى أن تكون هذه الخطوط أقصر ما يمكن، وبعد ذلك يجب طباعة نسخة طبق الأصل من خطوط التوصيل على الوجه النحاسي للوح ثم يُزال النحاس غير اللازم من الوجه وتترك فقط خطوط نحاسية مطابقة بالشكل والأبعاد لخطوط توصيل الدارة. توجد أقلام خاصة لرسم الخطوط على النحاس ولا يتأثر حبر هذه الأقلام بالحموض، وبعد رسم الخطوط توضع اللوحة في محلول حمضي فترة من الزمن فيتآكل النحاس ما عدا ما هو موجود تحت الخطوط. يُمسح الحبر بمادة كحولية فتصبح الدارة جاهزة للتثقيب. يمكن شراء مجموعة أدوات تصنيع الدارات المطبوعة من المتاجر التي تبيع قطعاً إلكترونية. هذه الطريقة البسيطة مناسبة لتصنيع نموذج واحد مثلاً من دارة مطبوعة في وقت واحد ولها بعض المشاكل وهي عدم الدقة العالية في الرسم وتتعلق دقة الرسم بالقلم المستخدم. يمكن زيادة الدقة باستخدام تقنيات أخرى ومن هذه التقنيات استخدام خطوط وأشكال نقاط توصيل جاهزة على شرائح ويتم نقل هذه الخطوط إلى شريحة شفافة بالضغط على الوجه العلوي بقلم وبعد الانتهاء من تكوين الخطوط والتوصيلات المطلوبة بالحجم المطلوب تؤخذ صورة سلبية لها ويوضع تحت الصورة السلبية لوح مطلي بالنحاس وتطلى طبقة النحاس بمادة حساسة للضوء، وعند مرور الضوء عبر الصور السلبية للدارة تؤثر على المادة الحاسة للضوء فتصبح عديمة التأثر بالحمض. توضع اللوحة في الحمض فيتآكل النحاس في المناطق التي لم تتعرض للضوء وتبقى خطوط التوصيل فقط. تزال المادة الحساسة للضوء بعد إخراج اللوحة من الحمض وغسلها بالماء بواسطة محلول خاص، وبعد ذلك يمكن تثقيب اللوحة بواسطة مثقب وبالطبع فإن عملية التثقيب تحتاج إلى وقت لا بأس به. توجد الآن طريقة لرسم توصيلات الدارة بالحاسوب وتتوفر آلات خاصة تحول الرسومات إلى (negative) صورة سلبية. إذا كنت بحاجة إلى دارة مطبوعة معقدة وعالية الدقة، فمن الأفضل أن تطلب من شركات خاصة أن تصنعها لك، لأن هذه الشركات لديها كل ما يلزم من برامج حواسيب وآلات وأدوات لإنجاز المطلوب بالشكل المطلوب وخاصة إذا كان عدد النسخ المطلوبة من الدارة المطبوعة كبيراً. وتستطيع هذه الشركات تصنيع دارات مطبوعة متعددة الطبقات (يصل عدد الطبقات إلى 18) ويستفاد من تعدد الطبقات في التخفيف من التوصيلات البينية. يمكن التعرف على أسماء وعناوين هذه الشركات من خلال البحث عنها في الإنترنت باستخدام الكلمات التالية ككلمات مفتاحية في عملية البحث (Printed Circuit boards).

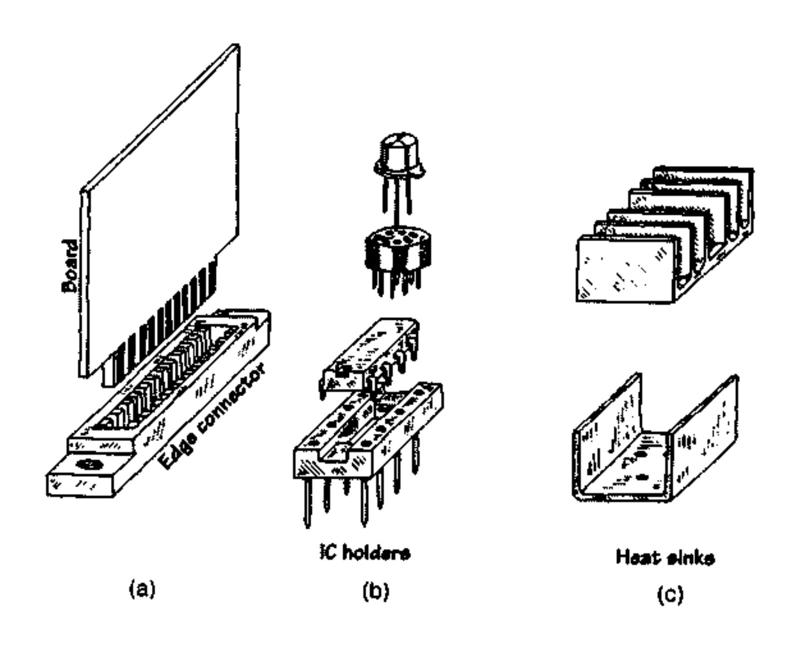
5.2.14: ملاحظة عن تخطيط اللوح

يجب ترتيب الدارات المتكاملة على الدارة وكذلك المقاومات على شكل صفوف وأن يكون لها نفس الاتجاه، كما يجب أن يترك إطار حول الدارة بعرض حوالي ربع إنش، وهذا الإطار ضروري لتركيب مساند اللوحة عليه بالإضافة إلى بعض أدوات الدلالة، وكذلك يجب إخراج أسلاك توصيل التغذية وأسلاك الدخل والخرج إلى طرف اللوحة. توصل أطراف الدخل والخرج عبر موصل طرفي (edge connector) أو موصل من النوع D (D-connector) أو موصل من نوع (barrier-strip connector) أو غيرها من الموصلات. يستحسن تجنب تركيب عناصر ثقيلة على اللوحة كي لا تتضرر اللوحة عند تعرضها للسقوط. يُنصح عادة بوضع علامات قطبية المكثفات على لوح الدارة وكذلك الأمر بالنسبة للديودات ويستحسن وضع بعض الدلالات إلى جوار أرجل الدارات المتكاملة، كما يجب وضع علامات لنقاط الاختبار والمقاومات وعناصر الضبط، إضافة إلى تزويد لوح الدارة بمبينات كالديودات المصدرة للضوء وبأقطاب (أطراف) خاصة بمصدر التغذية.

6.2.14: القطع الخاصة التي تستخدم في تركيب (بناء) الدارات

تستخدم ثلاث قطع أساسية في مرحلة بناء الدارة، وهذه المكونات هي مبددات الحرارة (أجسام التبريد heat sinks)، وحوامل الدارات المتكاملة وحوامل الترانزستورات (IC-and Transistor Socket holders)، والموصلات الطرفية

(Edge- Connectors) كما في الشكل. تصمم بعض ألواح الدارات بحيث يتم إدخالها في الموصل كما في الشكل (a.8.14) ويُلاحظ أن للوحة الدارة خطوط توصيل من الوجهين وهذه الخطوط يجب أن تكون عالية الناقلية (عادة تطلى بالذهب).



الشكل (8.14): بعض الأدوات التي تستخدم في بناء الدارات.

يتم إدخال لوحات الدارات – التي لها أصابع توصيل مطلية بالذهب- في قفص (Cage) خاص بالبطاقات مع عدد آخر من البطاقات. يُدخل كل لوح عبر موجه بلاستيكي إلى موصل طرفي (edge-connector). يمكن وصل الألواح المنفصلة بواسطة كابل مسطح متعدد النواقل (Flat multiple-conductor cable)، (انظر الشكل a.8.14) والشيء الجميل في هذه الألواح هو إمكانية نزعها من القفص بسهولة لإجراء اختبارات عليها، دون ارتكاب أية أخطاء. يستحسن عند تصميم نظام متعدد الألواح أن يتم تصميم لوح منفصل لكل مجموعة وظيفية (مثلاً لوح خاص بالمضخمات، ولوح خاص بالذواكر، إلخ) لأن ذلك يسهل عملية حصر وإيجاد الأعطال لاحقاً. تستخدم قواعد الترانزستورات والدارات المتكاملة إذا كان احتمال تعطل هذه العناصر واستبدالها لاحقاً كبيراً نسبياً (انظر الشكل (b8-14)) ويفضل في الواقع استخدام قواعد لكافة الدارات المتكاملة في الدارة. إن مبددات الحرارة هي عبارة عن سطوح معدنية كبيرة توصل مع العناصر التي تولد أثناء عملها حرارة عالية (كالديودات والترانزستورات الاستطاعية مثلاً) وذلك لتسهيل تبديد الحرارة، يُثبت الجسم المبدد للحرارة على العنصر بواسطة براغي وصواميل (انظر الشكل c8.14). يوضع شحم سيلكوني بين العنصر الإلكتروني وجسم التبريد، لأن الشحم السيلكوني يزيد الناقلية الحرارية (thermal conductivity) بين جسم العنصر الإلكتروني وجسم التبريد.

7.2.14: اللحام

إن مادة اللحام (Solder) هي خليطة من القصدير والرصاص (tin-Lead alloy)، وتستخدم مادة اللحام لتأمين التصاق لأطراف العناصر مع بعضها. تمزج مادة اللحام عادة مع قلفونة (rosin) تساعد على تحليل الأكاسيد الموجودة على سطح المعدن. يجب تنظيف أطراف العناصر من الزيوت والشموع والمواد الأخرى قبل تلحيمها مع بعضها بواسطة كاوي لحام (Solder-iron)، ويمكن تنظيف أطراف العناصر قبل تلحيمها بورق زجاج إذا لزم الأمر، لإزالة كافة العوالق والأجسام الغريبة الأخرى عنها. يستخدم عادة كاوي لحام منخفض الاستطاعة (25+40w) عند تلحيم العناصر على الدارات

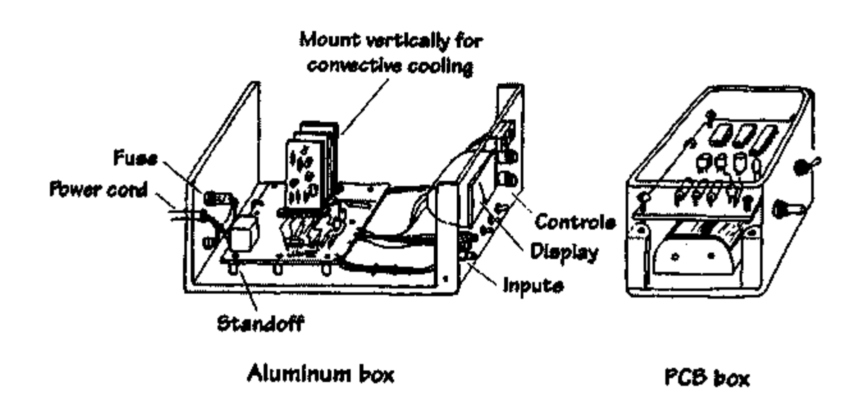
المطبوعة، ولضمان التلحيم الجيد يجب توفر قصدير منصهر لامع على رأس كاوي اللحام. يحتاج رأس كاوي اللحام مع الزمن إلى تنظيف من الأكاسيد ويتم استخدام قطعة من الإسفنج في عملية التنظيف، وبعد التنظيف توضع طبقة من القصدير على رأس كاوي اللحام. يُنصح عادة بتسخين الأطراف المعدنية للعناصر التي سيتم تلحيمها مع بعضها وعند وصول درجة حرارة هذه العناصر إلى الدرجة المناسبة يُذاب القصدير فوقها، ولا يفضل إذابة القصدير على أطراف العناصر قبل أن تكون قد سُخنت بالكاوي لأن التحكم بمكان نقطة اللحام يكون عند ذلك صعباً بسبب ميل القصدير المنصهر إلى التحرك باتجاه المنطقة ذات الحرارة الأعلى. يجب الانتباه عند تلحيم عناصر على لوح دارة مطبوعة كي لا تسقط نقاط القصدير على اللوح وفي أماكن غير مرغوبة لأن سقوط نقطة قصدير بين خطين قد يؤدي إلى وصلهما مع بعض ويؤدي ذلك طبعاً إلى حدوث خلل في عمل الدارة. يتم حماية العنصر الذي يجري تلحيمه من الحرارة الزائدة بمسكه (أو مسك طرفه) برأس بانسة معدنية، كما تتوفر ملاقط خاصة مبددة للحرارة مخصصة لهذه الغاية.

8.2.14: فك اللحام

تفك اللحامات عند استبدال العناصر بسبب التعطل، أو عند إجراء توصيلات غير صحيحة في مرحلة تجميع الدارة، ويتم ذلك ببساطة بوضع رأس الكاوي فوق النقطة وتحريك العنصر عندما يذوب القصدير وسحبه من مكانه. ولكن ذلك قد لا يكون سهلاً وخاصة عند محاولة نزع دارة متكاملة من لوح دارة، وفي هذه الحالة يفضل إذابة القصدير وسحبه بواسطة شفاط قصدير (Sucker). توجد طرق أخرى لسحب القصدير المذاب ولكن شفاط القصدير البسيط هو الأكثر استخداماً ويتكون شفاط القصدير من أسطوانة مزودة بمكبس ولها رأس دقيق مفرغ يوضع فوق النقطة المطلوب نزع القصدير منها ثم تسخن النقطة ويضغط على زر في الشفاط فيتحرر المكبس إلى الأعلى ساحباً معه القصدير المذاب. يُضغط محور المكبس باليد ليعود إلى الأسفل فيسقط القصدير الذي سحب من النقطة متصلباً ويصبح المكبس جاهزاً للاستخدام مرة أخرى.

9.2.14: تعليب الدارة

تُعلب الدارات عادة بواسطة صندوق ألمنيوم أو بلاستيك وتستخدم صناديق الألمنيوم عند تصميم الأجهزة عالية الجهد، أما العلب أو الصناديق البلاستيكية فتستخدم في التطبيقات منخفضة الجهد. وعند استخدام الصناديق المعدنية لتعليب الدارات يجب تأريض هذه الصناديق لتجنب الصدمات الكهربائية.



الشكل (9.14): نماذج من صناديق تعليب الدارات.

تُثبت ألواح الدارات المطبوعة ضمن الصندوق المعدني مرفوعة عن قاعدة الصندوق بواسطة حوامل عازلة. إذا كانت الدارة تغذى من جهد متناوب (ac) يتم إجراء ثقب لإدخال كابل التغذية في جسم الصندوق ويوضع عازل مطاطي على المحيط

الداخلي للثقب ثم يتم إدخال كابل التغذية. تركب المفاتيح والمقاييس والمقابض على الواجهة الأمامية للجهاز، أما المفاتيح قليلة الاستخدام والفيوزات (الفواصم) فتركب على الواجهة الخلفية للجهاز. يُنصح بتركيب مروحة لسحب أو دفع الهواء من الجهاز إذا كانت الدارة تولد حرارة تزيد عن (10W)، أما إذا كانت الاستطاعة أقل من ذلك فإن وجود ثقوب في جسم الصندوق المعلب للدارة تكفي لتبريد العناصر لأن الهواء يتجدد حول هذه العناصر عبر هذه الثقوب.

تُركب العناصر الاستطاعية كالترانزستورات مثلاً على جسم الصندوق الذي يعمل في هذه الحالة كمبدد حرارة وينصح بتثبيت العناصر التي لها مبددات حرارية بحيث تكون أجسام التبريد موجهة عمودياً، وعند تركيب أو تجهيز دارة متعددة الألواح (boards) ضمن الصندوق ترتب اللوحات عمودياً بشكل يسمح بتهوية كافة الألواح. تزود الصناديق البلاستيكية عادة بحوامل (Standoffs) بوضع لوح الدارة (Circuit board) فوقها وعادة ما تكون هذه الحوامل طويلة بحيث يبقى مكان تحت لوح الدارة لوضع البطاريات أو لتركيب مصوات أو غيره.

10.2.14: الأدوات الضرورية للاستخدام

إن المولد والأدوات التالية مفيدة ويحتاجها كل من يعمل في ورشة إلكترونية: بانسة ذات رأس دقيق، قطاعة أسلاك (Snipper)، قصدير، كاوي لحام، شفاط لحام، ملقط مبدد للحرارة، ماسك دارات متكاملة، أداة لثني أطراف الأسلاك، محلول مذيب (Solvent)، حامل لوح دارة مطبوعة، براغي وعزقات، حوامل فيوزات، مصابيح، فيوزات بأنواع مختلفة، قشارة أسلاك (أداة لإزالة العازل عن الأسلاك) أفومتر لقياس الأوم والفولت المستمر والمتناوب والجهد المستمر والمتناوب.

11.2.14: كشف أعطال الدارة التي بنيتها

إذا لم تعمل الدارة التي بنيتها بشكل جيد، فإنه يترتب عليك التأكد من عدم إهمال المقترحات الواردة في مخطط كشف الأعطال المبين في الشكل (14-10).

هل توجد تغذية في الدارة؟ لا

- تأكد من البطارية، ومن أسلاك التوصيل والمأخذ.
- تأكد من الفواصم.
- تأكد من أسلاك التوصيل.
- تأكد من صلاحية مفتاح وصل التغذية.

نعم

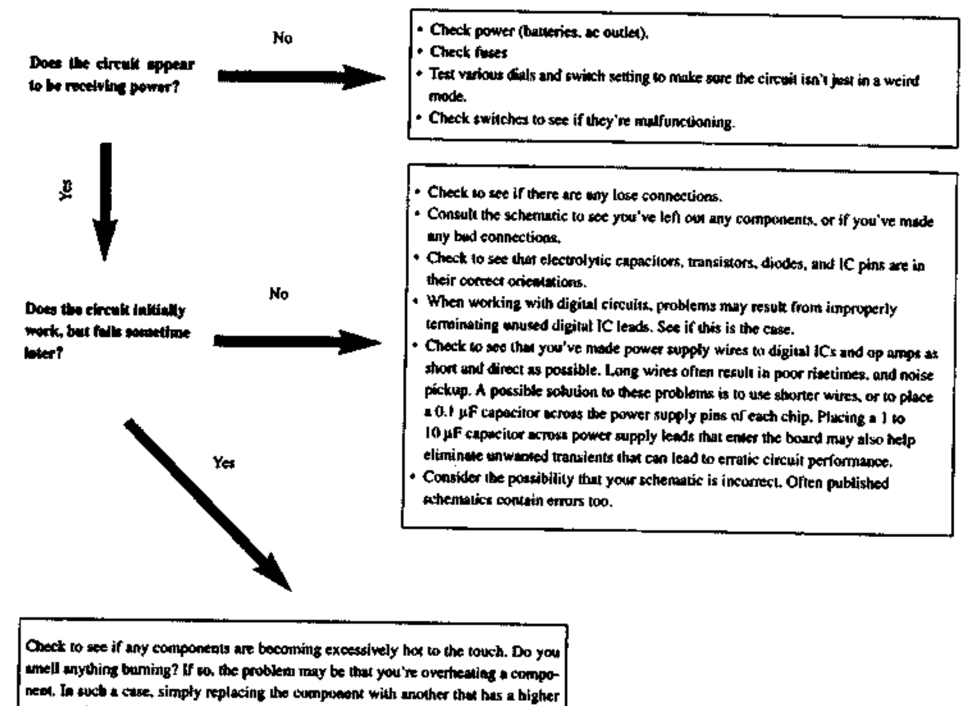
هل تعمل الدارة أحياناً وتتوقف أحياناً أخرى؟

لا

- تأكد من عدم وجود نقص في التوصيلات.
- راجع مخطط الدارة وتأكد من عدم نسيان عناصر أو من إجراء توصيلات غير صحيحة.
- تأكد من وضع الديودات والترانزستورات والدارات المتكاملة والمكثفات الكيميائية بالاتجاهات الصحيحة.
- عند التعامل مع دارات متكاملة قد تكون المشكلة ناتجة عن التحميل غير الصحيح لأرجل الدارات المتكاملة.
- عند تغذية الدارات المتكاملة والمضخمات العملياتية يجب أن تكون أسلاك توصيل التغذية أقصر ما يمكن وإذا كانت هذه الأسلاك طويلة تؤدي إلى زيادة أزمنة الصعود، وتحل هذه المشكلة باستخدام أسلاك قصيرة أو بوصل مكثف (0.1µF) بين رجل تغذية الدارة والأرض ويمكن وصل مكثف (10µF) بين خط التغذية والأرض لتقليل الضجيج.
- تأكد من صحة مخطط الدارة فقد يكون المخطط بالأساس غير صحيح.

نعم

تأكد من عدم ارتفاع حرارة بعض العناصر أثناء العمل. هل تشم روائح احتراق؟ إذا كان الوضع كذلك فإن العنصر يجب استبداله بعنصر ذي استطاعة أعلى أو يجب وضع مبدد حراري لهذا العنصر.

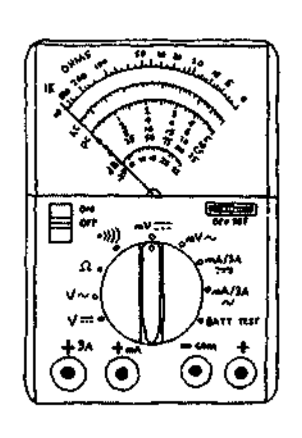


الشكل (10.14): مخطط ملاحقة الأعطال.

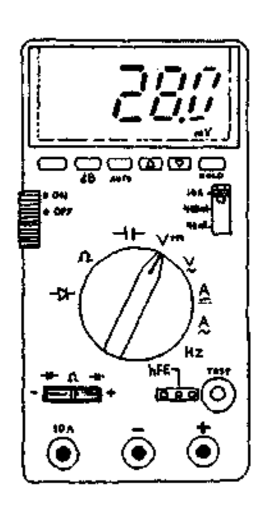
إذا فشلت كل التوجيهات السابقة في كشف سبب العطل حاول استبدال العنصر أو العناصر المشكوك بها فقد يكون استبدالها هو الحل، وإذا لم تنجح هذه المحاولة عليك العودة إلى المراجع التي تتحدث عن الدارة أو عن دارات مشابهة لها فقد تذكر هذه المراجع أسباب الأعطال ومصادرها وقد تعطيك فكرة للتغلب على المشكلة.

3.14: المقاييس متعددة الأغراض

المقياس متعدد الأغراض أو VOM (Volt-ohm-milliammeter) هو جهاز يستخدم لقياس التيار (Current)، والجهد (voltage) والمقاومة ويتوفر نوعان من هذا المقياس، نوع تشابهي (analog) ونوع رقمي (digital) كما في الشكل (14-11).




Analog multimeter



Digital multimeter

الشكل (11.14): أنواع المقاييس متعددة الأغراض.

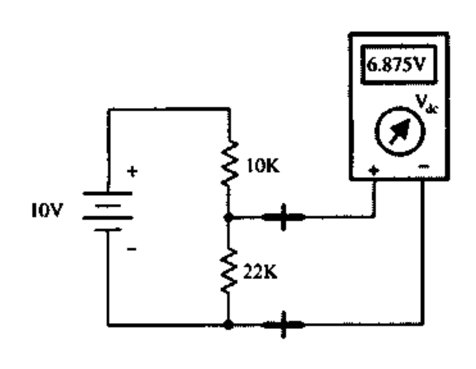
والفرق الواضح بين النوعين هو أن المقياس التشابهي يستخدم مؤشراً متحركاً يتأرجح فوق لوحة مدرجة ويتناسب انحراف المؤشر مع القيمة المقاسة أما المقياس الرقمي فيستخدم دارة معقدة لتحويل القيمة المقاسة إلى رقم يتم إظهاره مباشرة، وتعتبر المقاييس التشابهية أقل دقة من المقاييس الرقمية (نسبة الخطأ في القراءة للمقياس التشابهي أعلى بمقدار 3% من الخطأ في قراءة المقياس الرقمي)، كما أن القراءة منها أصعب مقارنة مع القراءة من المقياس الرقمي، هذا إضافة إلى أن دقة الإظهار في المقاييس التشابهية هي (0.01) و(0.001) للمقاييس الرقمية. وعلى الرغم من كل ذلك فإن مقاييس VOM التشابهية تتفوق على المقاييس الرقمية عند اختبار الدارات التي تحوي ضجيجاً كهربائياً كبيراً، لأن المقاييس التشابهية ذات ممانعة عالية للضجيج.

1.3.14: آلية العمل

قياس الجهود

يتم وضع مفتاح نوع القياس في المقياس متعدد الأغراض على وضعية قياس جهد مستمر (V_{dc}) عند قياس جهود مستمرة، وعلى وضعية قياس جهود متناوبة (V_{ac}) عند قياس جهود متناوبة، ثم توصل مجسات القياس إلى النقطتين اللتين نرغب بقياس الجهد بينهما فنحصل على القراءة. يوصل مقياس الجهد على التوازي (التفرع Parallel) مع العنصر الذي يقاس الجهد عليه كما في الشكل (14-12). تعبر قراءات الجهود المتناوبة عن القيم الفعالة أو المنتجة ويرمز لها بالرمز (V_{rms})، وتُعطى العلاقة بين القيمة المنتجة والمطال من القمة إلى القمة لإشارة جهد جيبي متناوب بالعلاقة:

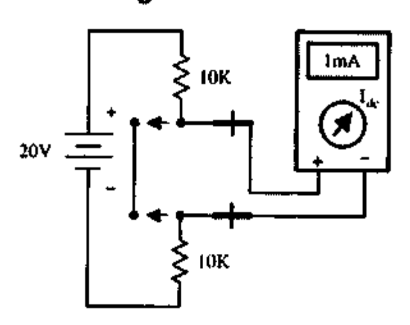
$$V_{rms} = (0.707)(V_{peak-to-peak})\cdot\frac{1}{2}$$



الشكل (12.14): وصل مقياس الجهد مع دارة لقياس الجهد بين نقطتين.

قياسات التيارات

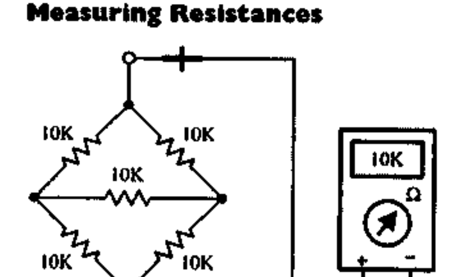
يوضع مفتاح نوع القياس على قياس تيار (مستمر أو متناوب) حسب نوع التيار المقاس ويوصل مقياس التيار (أو المقياس متعدد الأغراض) على التسلسل مع العنصر الذي نريد قياس تياره، ولأجل ذلك تُفصل الدارة في مكان قياس التيار ويوصل المقياس (توصل المجسات) كما في الشكل (14-13).



الشكل (13.14): طريقة توصيل مقياس التيار مع الدارة.

قياس المقاومات

تقاس المقاومة ببساطة بواسطة VOM يوضع مفتاح اختيار نوع القياس على وضعية قياس مقاومة (Ω) ويوصل المقياس بين طرفي المقاومة فتظهر قيمة المقاومة على شاشة الإظهار. يبين الشكل (14-14) كيفية وصل مقياس VOM لقياس مقاومة مكافئة لمجموعة مقاومات موصولة مع بعضها وصلاً مختلطاً. عند قياس مقاومات فرع من دارة تفصل التغذية عنها.



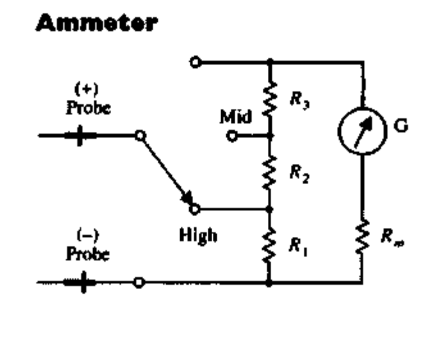
الشكل (14.14): وصل مقياس VOM لقياس مقاومات.

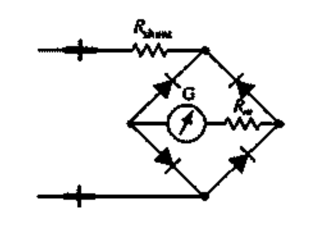
2.3.14 كيف تعمل المقاييس متعددة الأغراض

يحوي المقياس متعدد الأغراض VOM التشابهي على مقياس جهد، ومقياس تيار، ومقياس أوم وكلها في جهاز واحد، ويساعد فهم آلية عمل المقياس في كل نوع من القياس بمفرده على فهم آلية عمل الجهاز كمقياس متعدد الاستخدامات.

مقياس الأمبير

يحوي مقياس الأمبير على مقياس غلفاني نوع D-Aronval ويتكون هذا المقياس من مغناطيس كهربائي متحكم به تيارياً ويؤدي هذا المغناطيس إلى تطبيق عزم على إبرة دوارة موصولة مع نابض (نابض دائري). يتناسب انحراف الإبرة مع التيار المار في المغناطيس الكهربائي وللمغناطيس الكهربائي مقاومة R_m وتظهر هذه المقاومة في الدارة كما في الشكل (14-15)، وتبلغ قيمة R_m حوالي (2kΩ). يمكن استخدام المقياس الغلفاني بمفرده لقياس التيار، ولكن إذا كان التيار كبيراً فإنه سيؤدي إلى انحراف الإبرة إلى ما بعد حدود تدريج المقياس ولتلافي حدوث ذلك توصل مقاومات تفرعية مع المقياس الغلفاني ويؤدي وصل المقاومة على التوازي مع المقياس إلى تفريع التيار إلى تيار يمر في المقياس وتيار يمر في مقاومة التفريع ويجب قراءة قيمة التيار من التدريج المناسب والذي يوافق قيمة المقاومة التفرعية الموصولة مع المقياس. يمكن قياس تيارات متناوبة بهذا المقياس بإضافة جسر تقويم إلى الجهاز كما في الشكل بحيث يمر في المقياس الغلفاني دوماً تيار مستمر ويتناسب انحراف الإبرة مع التيار المتناوب المقاس. إن قيمة المقاومة الداخلية لمقياس التيار هي حوالي (2kΩ)، ولكن مقاومة المقياس المثالي يجب أن تكون صفراً.

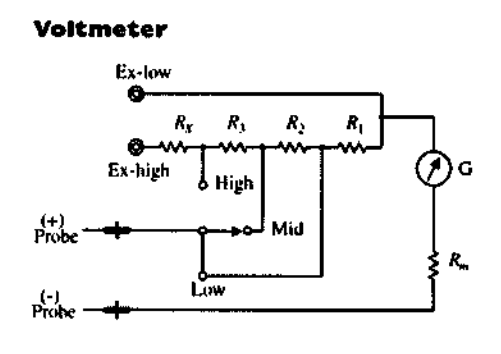




الشكل (15.14): أشكال توضيحية لمقياس الأمبير.

مقياس الفولت

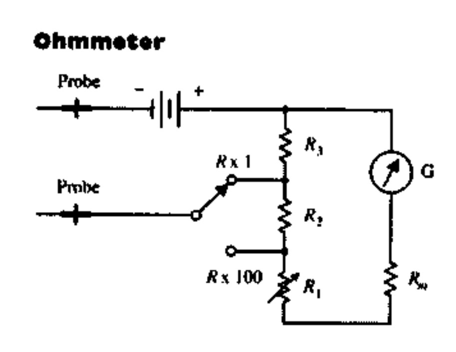
يحوي مقياس الفولت التشابهي على مقياس غلفاني نوع D-Arsonval وللمقياس الغلفاني مقاومة داخلية R_m. عند وصل مجسات مقياس الفولت بين نقطتين مختلفتين بالجهد، فإن تياراً يمر من الجهد العالي إلى الجهد المنخفض ويمر جزء من التيار عبر المقياس الغلفاني ويتناسب انحراف الإبرة مع الجهد المقاس. توصل مقاومات تفرعية مع المقياس الغلفاني من أجل معايرة وضبط انحراف الإبرة. تضاف دارة جسر تقويم إلى المقياس الغلفاني من أجل قياس الجهود المتناوبة (ac). تبلغ القيمة النموذجية للمقاومة الداخلية في مقياس الفولت حوالي 200kΩ، وأما في المقياس المثالي فيجب أن تكون هذه المقاومة لا نهائية.



الشكل (16.14): شكل توضيحي لمقياس الفولت.

مقياس الأوم

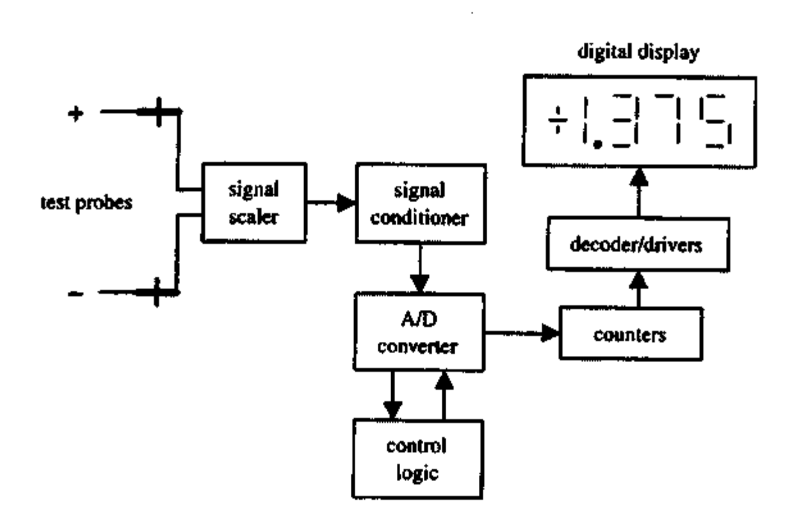
تستخدم بطارية داخلية لتأمين مرور تيار عبر المقاومة المقاسة وعبر المقياس الغلفاني، وعند قياس المقاومة فإن المقاومة تكون موصولة على التسلسل مع المقياس الغلفاني. إذا كانت المقاومة المقاسة صغيرة يكون التيار المار كبيراً وانحراف الإبرة كبيراً، أما إذا كانت المقاومة كبيرة يكون التيار صغيراً وانحراف الإبرة قليلاً. يقع الـ (0Ω) على يمين المقياس المدرج بعكس صفر الفولت والأمبير، ويتناسب التيار المار في المقياس مع المقاومة المقاسة، يجرى ضبط ومعايرة للمقياس قبل إجراء قياس به حيث توصل المجسات مع بعضها ويُضبط المؤشر على الصفر. توصل مجموعة مقاومات داخلية على التفرع مع المقايس الغلفاني من أجل ضبط انحراف الإبرة. تبلغ قيمة المقاومة الداخلية النموذجية لمقياس الأوم حوالي (50Ω) ويجب أن تكون هذه المقاومة صفراً في المقياس المثالي.



الشكل (17.14): شكل توضيحي لمقياس الأوم.

3.3.14: كيف تعمل المقاييس متعددة الأغراض الرقمية

يتكون المقياس الرقمي متعدد الأغراض (الاستخدامات) من عدد من المجموعات الوظيفية كما في المخطط الصندوقي المعطى في الشكل (14-18). أول مرحلة من مراحل الجهاز هي مرحلة (Signal Scaler) وهي عبارة عن مضخم/مخمد يعمل كناخب مجال، أما المرحلة الثانية (Signal Conditioner) فهي عبارة عن مرحلة تحول الإشارة إلى جهد مستمر يقع ضمن مجال المبدل التشابهي الرقمي (A/D)، وفي حال قياس جهد متناوب (ac) يحول الجهد المتناوب إلى جهد مستمر بواسطة جسر تقويم ومرشح وبدقة عالية. يُضبط ربح المرشح الفعال بحيث يتم الحصول على مستوى جهد مستمر يتناسب مع القيمة الفعالة للجهد المتناوب. تحوي مرحلة ملاءمة الإشارة (Signal Conditioner) على دارات تحول التيارات أو المقاومة إلى جهد مستمر يتناسب مع القيمة المقاسة، ويتم تحويل الجهد المستمر إلى خرج رقمي بواسطة مبدل A/D ويتم إظهار قيمة القياس على وحدة إظهار رقمي (digital display). تستخدم دارات قيادة منطقية رقمية لتأمين مزامنة العمل بين المبدل A/D ووحدة الإظهار.



الشكل (18.14): المخطط الصندوقي لمقياس رقمي متعدد الاستخدامات.

4.3.14: ملاحظة عن أخطاء القياس

عند قياس التيار المار عبر حمل (أو الجهد على الحمل أو مقاومة الحمل) فإن القراءة التي نحصل عليها من المقياس VOM ستكون دوماً مختلفة مقارنة بالقيمة الفعلية قبل وصل المقياس، وسبب هذا الخطأ هو المقاومة الداخلية للمقياس وتختلف المقاومة الداخلية للمقياس ذاته في وضعيات القياس المختلفة (الأوم، الفولت، والأمبير). تبلغ القيمة الفعلية للمقاومة الداخلية لمقياس التيار حوالي 2kΩ ولمقياس الفولت حوالي 100kΩ أو أكثر، أما مقاومة مقياس الأوم الداخلية فهي حوالي (50Ω) ومن الضروري معرفة هذه المقاومات الداخلية من أجل إجراء قياسات دقيقة وتبين الأمثلة التالية النسبة المئوية لخطأ القراءات لمقاييس بمقاومات دخل معلومة.

خطأ قياس التيار

احسب النسبة المئوية لخطأ قياس التيار للدارة المبينة في الشكل (19-14) إذا كانت المقاومة الداخلية للمقياس 2kΩ.

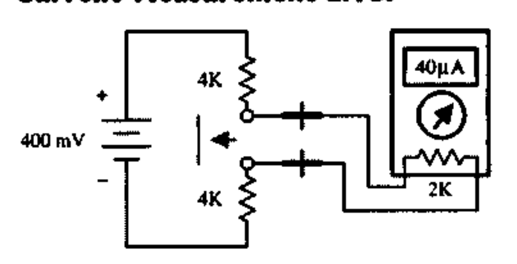
نحسب التيار الفعلي للدارة:

$$I_{true} = \frac{400mV}{4k + 4k} = 50\mu A$$

نحسب التيار المقاس:

$$I_{measured} = \frac{400mV}{4k + 2k + 4k} = 40\mu A$$

$$\%error = \frac{50\mu A - 40\mu A}{50\mu A} \times 100\% = 20\%$$



الشكل (19.14): دارة قياس تيار.

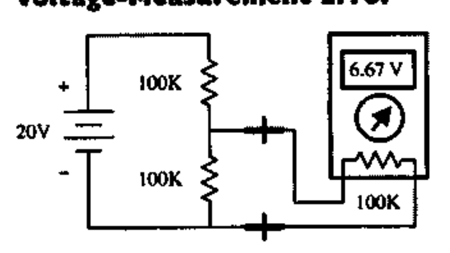
خطأ قياس الجهد

احسب النسبة المئوية لخطأ قياس الجهد في دارة الشكل (20-14) إذا كانت المقاومة الداخلية لمقياس الجهد 100kΩ:

$$V_{true} = \frac{100k}{100k + 100k} \times 20V = 10V$$

$$V_{measured} = \frac{\frac{100k \times 100k}{100k + 100k}}{100k + \frac{100k \times 100k}{100k + 100k}} \times 20V = 6.67V$$

$$\%Error = \frac{10 - 6.67}{10} \times 100\% = 33\%$$



الشكل (20.14): دارة لحساب خطأ قياس الجهد.

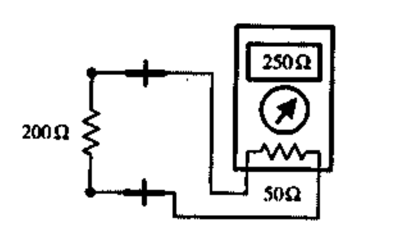
خطأ قياس المقاومة

احسب خطأ قياس المقاومة لدارة الشكل (21-14) إذا كانت المقاومة الداخلية لمقياس الأوم 50Ω.

$R_{true} = 200\Omega$

$R_{measured} = 200\Omega + 50\Omega = 250\Omega$

$$\%error = \left|\frac{200\Omega - 250\Omega}{200\Omega}\right| \times 100\% = 25\%$$



الشكل (21.14): دارة لحساب خطأ قياس المقاومة.

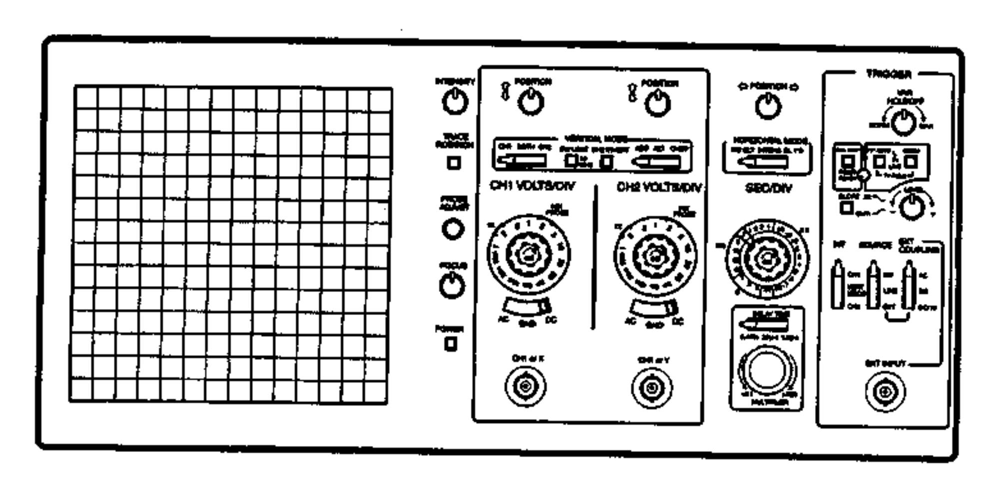
يجب أن تكون المقاومة الداخلية للمقياس أصغر من مقاومة ثيفينين للدارة الأصلية بحوالي 20 مرة أو أكثر وذلك من أجل تقليل النسبة المئوية للخطأ في مقياس التيار، أما في مقياس الفولت فيجب أن تكون مقاومة الجهاز الداخلية أكبر بحوالي (20) مرة أو أكثر من مقاومة ثيفينين للدارة الأصلية ونفس الشيء ينطبق على المقاومة الداخلية لمقياس الأوم إذ يجب أن تكون مقاومته أصغر بـ 20 مرة من مقاومة ثيفينين للدارة. يمكن تخفيض النسبة المئوية للخطأ إلى أقل من (5%) عند تحقق هذه الشروط. يمكن حساب القيمة الدقيقة باستخدام نتيجة القياس ومعرفة المقاومة الداخلية للمقياس حيث تحسب نسبة الخطأ ثم تضاف إلى القراءة أو تطرح منها فتحصل على القيمة الدقيقة للمقدار المقاس (تضاف نسبة الخطأ إلى القراءة عند قياس الجهود والتيارات وتطرح عند قياس مقاومات).

4.14: رواسم الإشارة

يقيس راسم الإشارة الجهود ولا يقيس التيارات والمقاومات، وهذا شيء يجب التأكيد عليه من البداية فراسم الإشارة إذاً يقيس الجهود فقط. يمكن اعتبار راسم الإشارة راسم (XY) سريع جداً ويستطيع أن يرسم إشارة الدخل كتابع للزمن كما يستطيع أن يرسم إشارة دخل كتابع لإشارة دخل أخرى. تبدو شاشة راسم الإشارة مثل شاشة جهاز التلفزيون.

عند تطبيق إشارة على الدخل تظهر بقعة مضيئة على الشاشة، وعند حدوث تغير في الدخل تستجيب البقعة الضوئية للتغير فتحرك إلى الأعلى والأسفل، أو إلى اليمين أو اليسار. يكون محور الدخل (المحور Y) في راسم الإشارة هو المحور الذي يستقبل الجهد المطبق على الدخل وتتحرك النقطة الضوئية إلى الأعلى أو الأسفل حسب تغيرات جهد الدخل في لحظة من الزمن، أما المحور الأفقي فيستخدم كمحور للزمن (time axis)، ويوجد في راسم الإشارة جهد خطي يستخدم لتحريك النقطة عبر الشاشة من اليسار إلى اليمين بمعدل يمكن ضبطه يدوياً من قبل المستثمر. إذا كانت الإشارة تكرارية (كالإشارة الجيبية مثلاً) فإن راسم الإشارة يظهرها ساكنة وهذا يجعل راسم الإشارة أداة مفيدة لتحليل الجهود المتغيرة مع الزمن.

ومع أن راسم الإشارة لا يقيس إلا الجهود فقط فمن الممكن تحويل الكميات كالتيار والإجهاد والتسارع، والضغط إلى جهود كهربائية وعندها يمكن استخدام راسم الإشارة لمراقبة هذه الكميات. تستخدم مقاومة معروفة لتحويل التيار إلى جهد. ويقاس التيار بشكل غير مباشر عن طريق قياس الجهد على المقاومة ثم يطبق قانون أوم لحساب التيار. تستخدم حساسات (أو مبدلات كميات غير كهربائية إلى كهربائية Transducers) لتحويل الحركة (movement)، أو الإجهاد (Strain) إلى جهود كهربائية. يمكن إذن تحويل الضغط مثلاً إلى جهد كهربائي وباستخدام إجراءات معايرة يمكن قياس الضغط بدقة بواسطة راسم الإشارة.



الشكل (22.14): الواجهة الامامية لراسم إشارة.

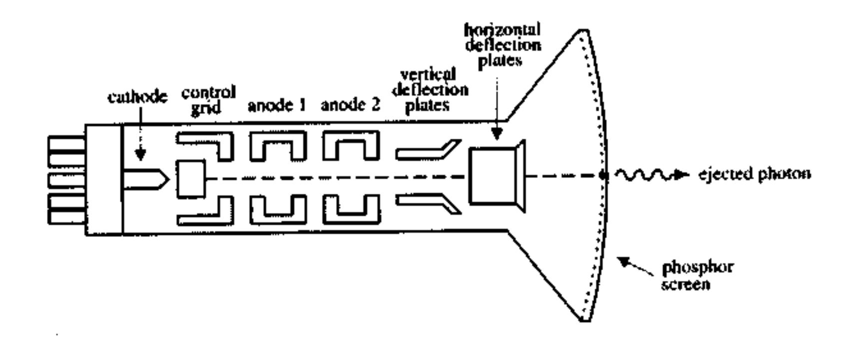
1.4.14: كيف تعمل رواسم الإشارة

يبنى راسم الإشارة على صمام أشعة مهبطية، وكل الدارات الموجودة داخل راسم الإشارة تصمم لتأخذ إشارة دخل وتعدلها وتحولها إلى مجموعة من التعليمات الكهربائية التي تطبق على المدفع الإلكتروني للصمام وإلى تعليمات لتوجيه البقعة (أي الموضع الذي تركز عليه الحزمة). إن أغلب المسكات (Knobs) والمفاتيح (Switches) الموجودة على الواجهة الأمامية لرسام الإشارة تصمم للمساعدة في تعديل التعليمات (instructions) المرسلة إلى صمام الأشعة المهبطية. تستخدم هذه المتحكمات (المسكات والمفاتيح) لضبط مقياس الجهد (voltage scale)، ومقياس الزمن (Time Scale) وشدة إضاءة الحزمة الإلكترونية (intensity of beam) وكذلك تركيز الحزمة (focus of beam)، وكذلك لاختيار الأقنية، والقدح وغيرها.

صمام الأشعة المهبطية

يتكون صمام الأشعة المهبطية من مدفع إلكتروني (فتائل، مهبط، شبكة حاكمة، ومصعد) ومن مصعد ثانٍ ومن صفائح انحراف عمودي، وصفائح انحراف أفقي ومن شاشة مطلية بالفوسفور.

عند مرور تيار عبر الفتائل فإن الفتائل تسخن المهبط إلى درجة تؤدي إلى إصدار الإلكترونات منه. تتحكم الشبكة الحاكمة بمقدار الإلكترونات المنطلقة من خلالها وبالتالي فهي تتحكم بشدة الإضاءة. عند جعل جهد هذه الشبكة سالباً فإن الإلكترونات تُدفع إلى الوراء ويقل التيار الإلكتروني. يتم تركيز الحزمة الإلكترونية على نقطة حادة عن طريق تطبيق جهد تحكمٍ أو جهد تركيز (Focus Voltage) على المصعد الأول. يطبق جهد عالٍ على المصعد الثاني ليعطي إلكترونات الحزمة عزماً إضافياً كي يسبب اصطدام الإلكترونات بالشاشة المطلية بالفوسفور إصدار فوتونات. يُسمى قسم تركيز الحزمة في الصمام باسم المدفع الإلكتروني (electron gun). توجد في صمام الأشعة المهبطية مجموعتان من صفائح الانحراف الكهربائي الساكن electrostatic deflection plates (عمودية وأفقية)، وتتوضع صفائح الانحراف هذه بين المصعد الثاني والشاشة المطلية بالفوسفور. تستخدم إحدى مجموعات الانحراف لحرف الحزمة عمودياً والثانية لحرف الحزمة أفقياً فعندما يصبح جهد إحدى الصفائح أكثر سلبية من الصفيحة الأخرى فإن الإلكترونات تنحرف مبتعدة عنها ومقتربة من الصفيحة الأخرى. (تتحرك الإلكترونات بسرعة أمامية كافية بحيث لا تصطدم الإلكترونات نهائياً بالصفائح). عند تطبيق جهد سن منشاري على صفائح الانحراف الأفقي فإن الجهد المتزايد تدريجياً (خطياً) على الصفائح يجذب حزمة الإلكترونات من الصفيحة السالبة إلى الصفيحة الموجبة مما يجعل حزمة الإلكترونات تمسح الشاشة الفوسفورية أما صفائح الانحراف العمودي فتسبب حركة حزمة الإلكترونات إلى الأعلى والأسفل.

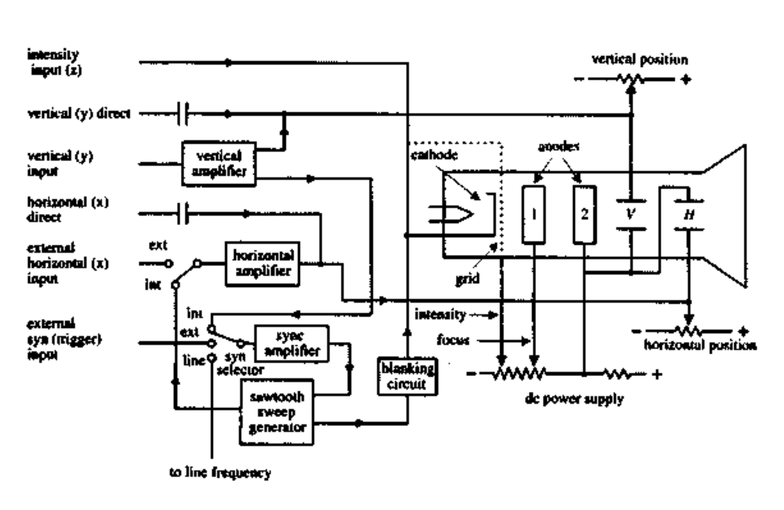


الشكل (23.14): مكونات صمام الأشعة المهبطية.

الخطوة التالية في فهم آلية عمل راسم الإشارة هي فهم كيفية تحويل إشارة الدخل إلى مجموعة من الإشارات الكهربائية أو الجهود التي تتحكم بآلية توجيه الحزمة في صمام الأشعة المهبطية، وهنا يأتي دور الدارات الداخلية.

الدارات الداخلية لراسم الإشارة

لنأخذ إشارة جيبية ونرى كيف تقوم الدارات الداخلية للراسم بتحويلها إلى شيء يمكن رؤيته على الشاشة. أول شيء نفعله هو تطبيق الإشارة على الدخل العمودي (Vertical input) حيث يتم تضخيم الإشارة بواسطة مضخم عمودي (Vertical amplifier) كي تصبح ذات جهد كاف لحرف حزمة الإلكترونات، تُرسل الإشارة من خرج المضخم العمودي إلى ناخب المسح (Sweep Selector)، وعندما يوضع ناخب المسح على وضع داخلي (internal)- سوف نشرح الوضع الآخر external فيما بعد-



الشكل (24.14): الدارات الداخلية لراسم الإشارة.

فإن الإشارة تدخل إلى مضخم تزامن (Sync amplifier) ويستخدم مضخم التزامن لمزامنة المسح الأفقي (المسح في هذه الحالة سن منشاري) مع الإشارة المطبقة على الدخل. تُزاح الإشارة عبر الشاشة بصورة عشوائية إذا لم يستخدم مضخم التزامن. يُرسل مضخم التزامن إشارة إلى مولد المسح سن المنشاري ليخبره فيها ببدء دورة (Cycle)، وعندها يُرسل مولد المسح إشارة سن منشار إلى المضخم الأفقي وذلك عندما يوضع الدخل الأفقي في وضع (internal)، وبنفس الوقت تُرسل إشارة من مولد المسح الأفقي إلى دارة الحجب (blanking Circuit)، ودارة الحجب تولد جهداً سالباً عالياً على الشبكة الحاكمة (أو جهداً موجباً عالياً على مهبط صمام الأشعة المهبطية) وذلك من أجل قطع الحزمة الإلكترونية عندما تعود إلى نقطة البداية، وأخيراً تُرسل جهود من المضخمات الأفقية والعمودية (سن المنشار) إلى صفائح الانحراف الأفقي والعمودي بشكل متزامن وتظهر بالنتيجة إشارة جيبية على شاشة الراسم. سوف يتم شرح الميزات الأخرى كالدخل الأفقي المباشر (horizontal direct input) والدخل العمودي المباشر، والدخل الأفقي الخارجي، والقدح الخارجي (external trigger)، وتردد الخط (line frequency)، والنمط (XY) وغيرها من الأمور لاحقاً في هذا الفصل. من الضروري أن نشير هنا إلى أن راسم الإشارة لا يستخدم دوماً

جهداً سن منشاري لتطبيقه على صفائح الانحراف فبالإمكان تغيير وضع المفاتيح والمسكات وذلك لاستخدام إشارة أخرى من أجل المحور الأفقي. يمكن فهم عمل المتحكمات الأخرى مثل التحكم بشدة الإضاءة (intensity) والتركيز (focus) والموقع الأفقي والعمودي للحزمة بالنظر إلى مخطط دارة راسم الإشارة.

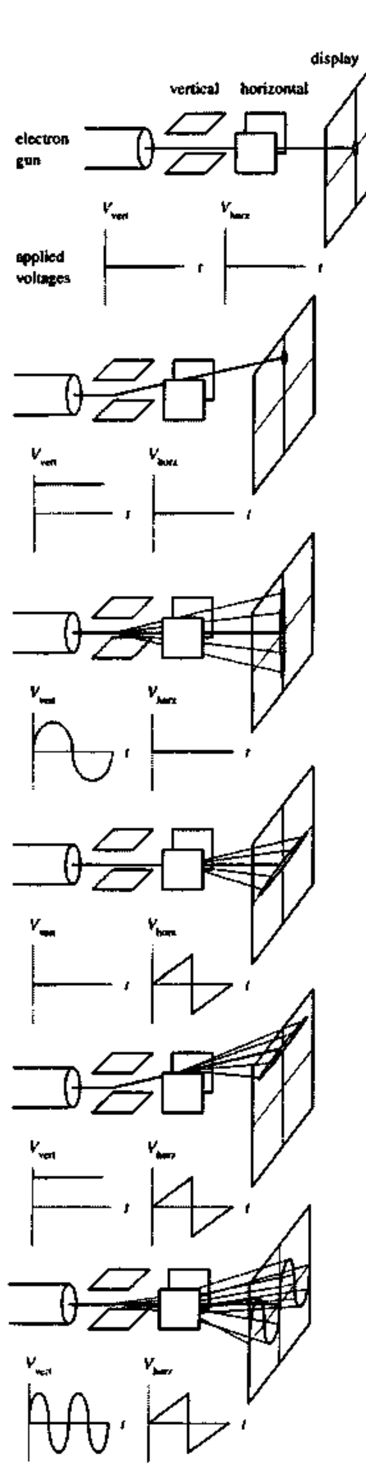
3.4.14: توجيه الحزمة

تتركز الحزمة الإلكترونية على شكل بقعة في مركز الإظهار (مركز الشاشة) لراسم الإشارة، عندما لا يتم تطبيق جهود على صفائح الانحراف الأفقي والعمودي. تنحرف الحزمة الإلكترونية إلى الأعلى أو الأسفل حسب إشارة الجهد المستمر المطبق على صفائح الانحراف العمودي، وذلك في حالة عدم تطبيق أي جهد على صفائح الانحراف الأفقي.

في حالة عدم تطبيق أي جهد على صفائح الانحراف الأفقي وتطبيق جهد جيبي على صفائح الانحراف العمودي يظهر خط عمودي على المحور (Y) الراسم الإشارة. أما في حالة عدم تطبيق أي جهد على صفائح الانحراف العمودي وتطبيق جهد سن منشاري على صفائح الانحراف الأفقي فإن الحزمة الإلكترونية ترسم خطاً على المحور الأفقي للراسم من اليسار إلى اليمين، وتقفز الحزمة إلى اليسار بعد كل نبضة سن منشارية.

إذا طبق جهد مستمر على صفائح الانحراف العمودي وجهد سن منشاري على صفائح الانحراف الأفقي فإن حزمة الإلكترونات ترسم خطاً أفقياً مزاحاً إلى الأعلى أو إلى الأسفل حسب إشارة الجهد المطبق على صفائح الانحراف العمودي (+ أو -).

في حال تطبيق جهد جيبي على صفائح الانحراف العمودي وجهد سن منشاري على صفائح الانحراف الأفقي ترسم الحزمة الإلكترونية إشارة جيبية لأن الحزمة تنحرف إلى الأعلى والأسفل حسب تغيرات الجهد الجيبي وبنفس الوقت تنحرف حسب إشارة سن المنشار من اليسار إلى اليمين. إذا كان تردد الإشارة الجيبية ضعفي تردد إشارة سن المنشار فإن ذلك يؤدي إلى ظهور دورين من الإشارة الجيبية على شاشة الراسم. انظر الشكل (14-25).

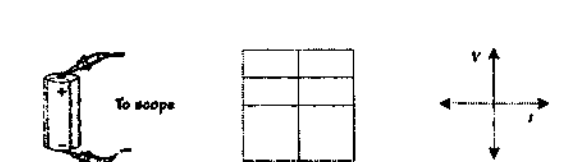


الشكل (25.14): توجيه الحزمة الإلكترونية.

4.4.14: تطبيقات راسم الإشارة

مقياس جهد مستمر

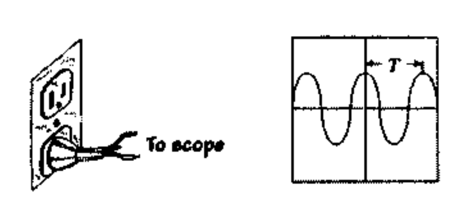
عند وصل مجسات راسم الإشارة لقياس جهد بطارية مثلاً يظهر على الشاشة خط مستقيم مزاح إلى الأعلى بمقدار يتناسب مع جهد البطارية. كما في الشكل العلوي من (26-14).



مقياس جهد متناوب/مقياس تردد

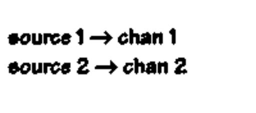
عند تطبيق جهد جيبي متناوب على راسم إشارة يمكن ببساطة قياس القيمة العظمى للجهد (V_{max}) والدور (T) وحساب التردد (f) والقيمة الفعالة (المنتجة) للجهد من العلاقات:

$$f = 1/T; V_{rms} = V_{max} / \sqrt{2}$$



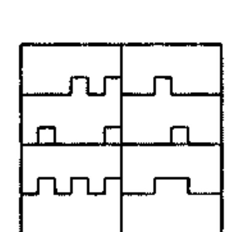
قياس العلاقة الصفحية بين إشارتين

يمكن استخدام راسم الإشارة لمقارنة إشارتين (عن طريق قياس فروقات الصفحة والترددات)، وتطبق الإشارة الأولى (Source-1) على القناة (1) لراسم الإشارة، والإشارة الثانية (Source-2) على القناة (2) في الراسم.



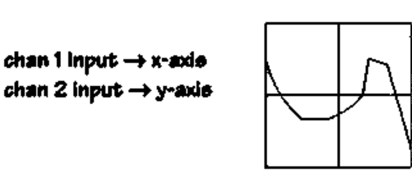
القياسات الرقمية

يمكن إظهار أشكال النبضات بمختلف أنواعها كنبضات التوقيت (Timining) ونبضات clock وغيرها من الإشارات التي يتم التعامل معها في الدارات الرقمية.



النمط XY، الرسومات (XY)

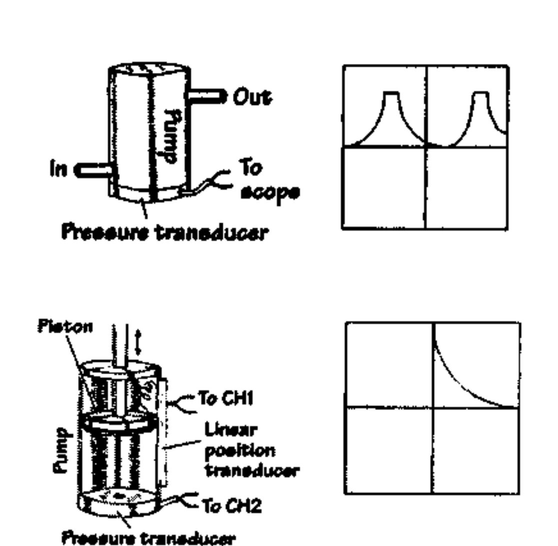
يستخدم المدخل (X) في هذه الحالة كمحور للجهد وليس كمحور للزمن، وتطبق الإشارة الأولى على القناة الأولى التي تعمل كمحور (X) والإشارة الثانية على القناة الثانية التي تعمل كمحور (Y) وبذلك تظهر العلاقة بين الإشارة الثانية على المحور (Y) والإشارة الأولى على المحور (X) كمنحنٍ بياني.



الشكل (26.14): أشكال توضح استخدام راسم الإشارة لإجراء قياسات متعددة.

القياسات باستخدام مبدلات الإشارات

إن مبدلات الإشارة هي أدوات تحول الإشارات غير الكهربائية كالضغط مثلاً إلى إشارة كهربائية فإذا تم تطبيق ضغط على دخل مبدل إشارة (Pressure Transducer) وطبق خرج هذا المبدل على راسم الإشارة، فإن راسم الإشارة يُظهر تغيرات الضغط كتابع للزمن، حيث تكون إشارة الضغط هي إشارة المحور (Y) والزمن هو إشارة المحور (X). أما إذا تم مثلاً كما في الشكل الأخير من (14-26) وصل إشارة خرج مبدل ضغط مكبس (Piston) إلى المدخل (Y) وإشارة خرج مبدل موضع خطي (Linear Position transducer) إلى المدخل (X) فإن راسم الإشارة يظهر منحنياً يوضع علاقة ضغط المكبس (على المحور Y) بموضع المكبس (على المحور X).

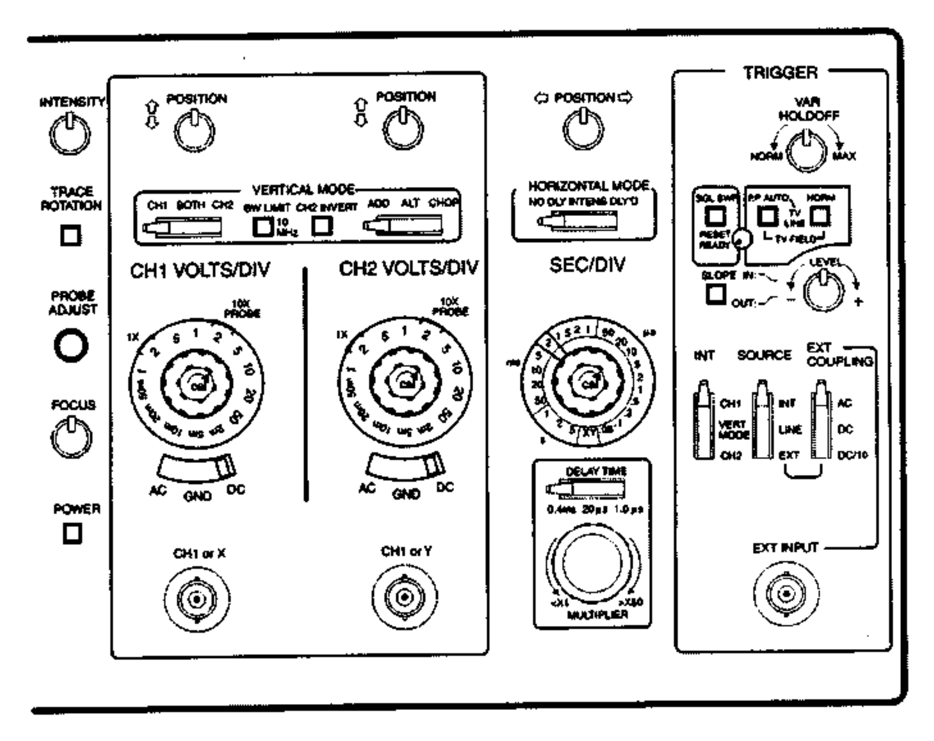


تابع الشكل (26.14): اشكال توضح استخدام راسم الإشارة لإجراء قياسات متعددة.

5.4.14: وظائف المسكات والمفاتيح الموجودة على واجهة راسم الإشارة

يبين الشكل (14-27) مخططاً للواجهة الأمامية لراسم الإشارة وتسمى الواجهة الأمامية للراسم أيضاً باسم لوحة التحكم بالراسم (Control Panel). قد تكون واجهة راسم الإشارة لديك مختلفة عن هذا الشكل من حيث مواقع المفاتيح (Switches) والمسكات (Knobs) وعدد أقنية الدخل والإظهار الرقمي (digital display)، وغيرها، وإذا لم تجد كل ما تحتاجه في هذه الفقرة فإنه يتوجب عليك الرجوع إلى دليل الاستخدام User manual لراسم الإشارة الذي تورده الشركة الصانعة مع الجهاز. تقسم لوحة التحكم بالراسم (الواجهة الأمامية) إلى الأقسام التالية:

- قسم النمط العمودي (Vertical mode): ويحتوي هذا القسم على كافة المفاتيح والأزرار (buttons) والمسكات التي تستخدم للتحكم العمودي بالأشكال والإشارات كالتحكم بالمطال وبالإزاحة العمودية على الشاشة.
- قسم الانحراف الأفقي (Horizontal mode): ويحوي هذا القسم كافة المفاتيح والأزرار والمسكات التي تتحكم بالقسم الأفقي من الإظهار وأهم مفتاح فيها هو مفتاح القاعدة الزمنية (Time-base).
- قسم نمط القدح (Triggering mode): ويحوي هذا القسم على مفاتيح وأزرار للتحكم بالطريقة التي يقوم وفقها راسم الإشارة بقراءة إشارة الدخل، وهو القسم الأكثر تقنية في الراسم، ولفهم القدح ننصح بقراءة الفقرة التالية، وسنبين وظائف هذه المفاتيح لاحقاً.

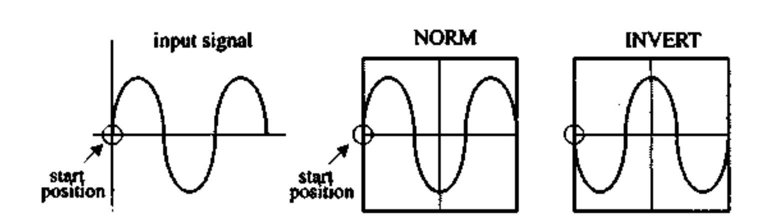


الشكل (27.14): الواجهة الامامية لراسم إشارة.

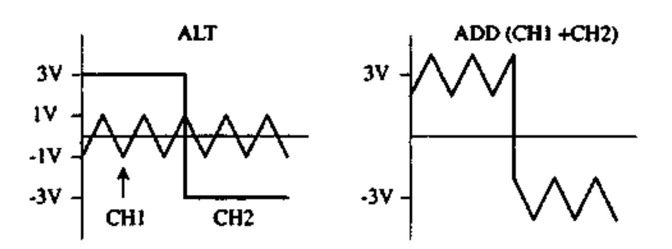
مفاتيح قسم النمط العمودي

- مداخل محورية CH1, CH2 Coaxial inputs توصل إليها إشارات الدخل.
- مفاتيح DC, GND, AC. عند وضع هذا المفتاح والذي يسمى مفتاح نمط ربط الإشارة مع الراسم (Coupling mode) على وضع AC فإن المركبة المستمرة للإشارة تحجب ويمر فقط القسم المتناوب من الإشارة، أما الوضع DC فإنه يسمح بمرور المركبات المستمرة والمتناوبة للإشارة، أما الوضع GND فإنه يؤرض الدخل أي يجعل صفائح الانحراف العمودي للراسم غير مشحونة ولا تتم إزاحة الحزمة إلى الأعلى أو الأسفل (يلغي الانحراف العمودي) ويستخدم هذا الوضع لإعادة معايرة وضبط الحزمة الإلكترونية في مكان (موقع) معياري على الشاشة بسبب تغيير موقعها بواسطة مفتاح (مسكة) الإزاحة العمودية.
- مسكات CH2 VOLTS/DIV وCH1 VOLTS/DIV: تستخدم هذه المفاتيح لاختيار مقياس الجهد (Voltage Scale) على شاشة الإظهار، فمثلاً إذا وضع المفتاح على حالة (5V/div) فإن ذلك يعني أن كل تقسيمه (1cm) على المحور العمودي تقابل (5V).
- مفاتيح نمط العمل MOD-Switches وهي CH1, CH2, BOTH (DUAL)، وتسمح لك هذه المفاتيح باختيار تشغيل الراسم على قناة واحدة هي CH1 أو CH2 أو تشغيله بقناتين في آن واحد CH1 وCH2.
  - مفاتيح INVERT وNORM وتسمح هذه المفاتيح بإظهار الإشارة بشكلها الطبيعي (normal) أو المعكوس (inverted) كما في الشكل (14-28).
  - مفاتيح CHOP، ALT، ADD
    - مفتاح ADD: وفي هذه الحالة تجمع إشارتي القناة الأولى والثانية مع بعض، كما في الشكل (14-29).
    - مفتاح ALT: ويتم بواسطته اختيار مسح متعاقب (Alternate Sweep) بغض النظر عن زمن المسح، ويُلغى في هذه الحالة تأثير المفتاح (NORMCHOP).

- مفتاح CHOP: يُشغل مفتاح مصدر (SOURCE) القدح، ويؤمن اختياراً آلياً أو يدوياً لطريقة توليد مسح ثنائي الأثر (dual-trace) متعاقب (alternating) أو (Chop).
- مفتاح الموضع (POSITION Knob): يسمح هذا المفتاح بإزاحة الإشارة التي تظهر على الراسم إلى الأعلى أو الأسفل.
- زر النمط XY (XY mode): يتوقف مولد معدل المسح عن العمل (القاعدة الزمنية) عند ضغط هذا الزر، وتُطبق إشارة خارجية على دخل القناة الثانية للراسم بدلاً من مولد المسح.



الشكل (28.14): إظهار الإشارة بوضعها الطبيعي أو معكوسة.



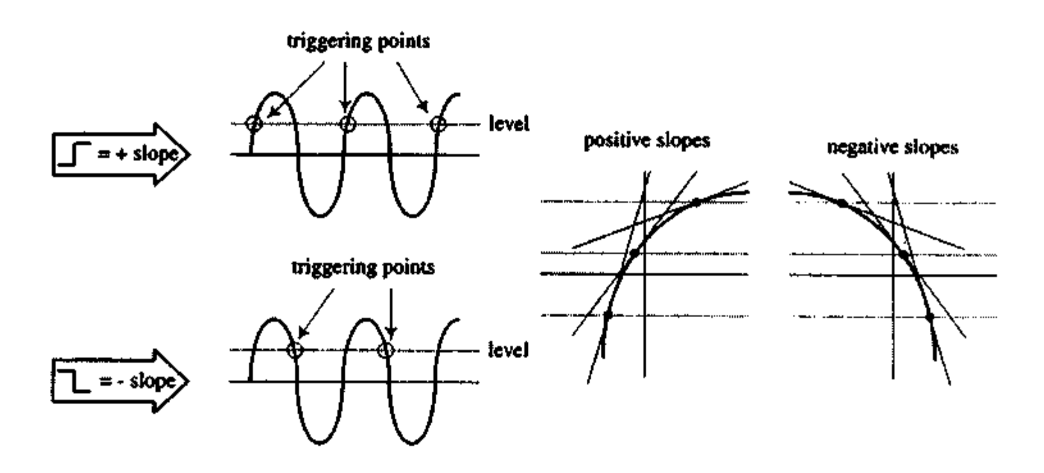
الشكل (29.14): وظائف أزرار ALT وADD.

ازرار ومفاتيح قسم النمط الأفقي

- مقبض SEC/DIV: يستخدم هذا المقبض لوضع (تحديد) سرعة المسح أو لاختيار مقياس محور الزمن أو المحور الأفقي. إذا وضع هذا المفتاح مثلاً على حالة 0.5ms/DIV، فإن ذلك يعني أن كل تقسيمة على المحور الأفقي (1cm) تساوي (0.5ms).
- مفاتيح النمط (MOD Switches): مفتاح NODLY وفي هذه الحالة تطبق الإشارة الأفقية على الإظهار مباشرة دون تأخير.
  - مفتاح DLY'D وفي هذه الحالة يتم تأخير الإشارة الأفقية لوقت يتم تحديده في قسم التأخير للراسم، وبإمكانك تحديد مقدار التأخير الزمني للإشارة.
- مفتاح التحكم المتغير بزمن المسح (SWEEP-TIME Variable Control) ويسمى هذا المفتاح بأسماء مختلفة منها مفتاح التحكم بتردد المسح (Sweep frequency Control)، أو مفتاح التحكم الناعم بالتردد (Fine Frequency Control)، ويستخدم للضبط الدقيق (الناعم) لزمن المسح. عند وضع هذا المفتاح على حالة (CAL) فإن زمن المسح يعايرِ باستخدام مفتاح SWEEP TIME/CM، أما في الوضعيات الأخرى فإن التحكم المتغير يؤمن معدل مسح متغيرا باستمرار.
- مفتاح الموضع (POSITION Knob): ويعمل هذا المفتاح على تحريك الإظهار أفقياً إلى اليمين أو اليسار ويُستخدم هذا المفتاح عند مقارنة إشارتي دخل حيث يتم ضبط بدايات الإظهار للإشارتين من أجل المقارنة.

ازرار ومفاتيح نمط القدح

- ❑ مدخل القدح الخارجي (EXT TRIG): مدخل لإشارة قدح خارجي.
- ❑ طرفية معايرة (CAL Terminal): تؤمن هذه الطرفية إشارة موجة مربعة بتردد 1kHz ومطال (0.1V) من القمة -إلى- القمة من أجل معايرة مخمدات المضخم العمودي ولاختبار التعويض الترددي (frequency Compensation) للمجسات المستخدمة مع الراسم.
- ❑ مفتاح التحكم (HOLDOFF Control): ويستخدم لضبط زمن holdoff (فترة توقيف القدح ما بعد استمرار المسح).
- ❑ مفتاح نمط القدح (TRIGGERING mode Switch) وله الوضعيات: SINGLE. عندما تكون الإشارة المراد إظهارها غير تكرارية، أو متغيرة المطال، أو الشكل أو الزمن، فإن الإظهار التكراري التقليدي يؤدي إلى عرض غير مستقر للإشارة، ولذلك يوضع نمط المسح على (SINGLE) حيث يُمكن مفتاح RESET من أجل العمل بمسح أحادي مقدوح.
  - وتستخدم هذه الحالة لتصوير الإشارات غير التكرارية (nonrepetitive Signals)، فعند ضغط زر RESET يتفعل مسح أحادي (Single Sweep) يبدأ مع نبضة التزامن التالية.
  - NORM وتستخدم هذه الحالة للعمل بسمح مقدوح. يتم التحكم بعتبة المسح بمفتاح التحكم بمستوى القدح (triggering Level Control)، ولا يتم توليد مسح بغياب إشارة القدح أو عندما يوضع مستوى القدح على قيمة تسمح بزيادة العتبة (threshold) لمطال إشارة القدح (انظر الشكل 31-14).



الشكل (30.14): نقاط القدح في حالات الميل السالب والموجب.

- AUTO: وهنا يتم اختيار عمل بمسح آلي حيث يعمل مولد المسح بشكل حر ويولد نبضات المسح بدون إشارة قدح (وتسمى هذه الحالة عادة بحالة العمل بمسح ارتدادي recurrent sweep operation). في حالة العمل بنمط AUTO ينتقل مولد المسح آلياً إلى العمل بنظام مسح مقدوح عند وجود إشارة قدح ذات مستوى مناسب (مقبول). يستحسن العمل بنمط AUTO في بداية تشغيل الراسم لملاحظة الإشارات ويؤمن هذا النمط إظهار الإشارات حتى يتم ضبط نمط القدح على النوع المرغوب.

  يجب استخدام مسح بنمط DC AUTO عند إجراء قياسات على جهود مستمرة أو عند التعامل مع إشارات ذات مطالات صغيرة غير كافية لقدح مولد المسح.
- FIX: وهذا النمط مشابه لنمط AUTO، إلا أن القدح يحدث عادة عند مركز موجة القدح المتزامنة بغض النظر عن إعدادات (وضعية) مفتاح التحكم بمستوى القدح.

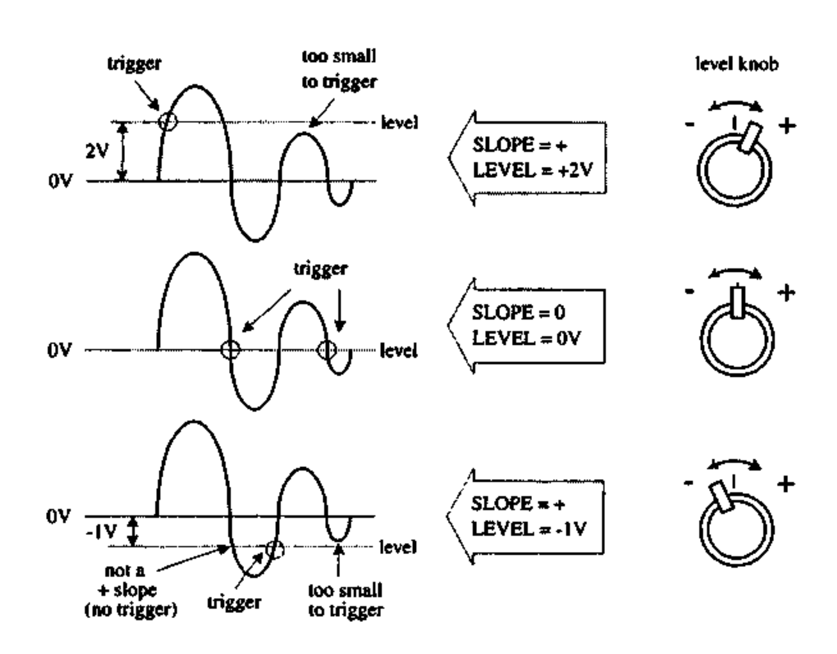
- زر الميل (SLOPE button): ويتم بواسطته اختيار النقطة التي يُقدح عندها الراسم، وعند اختيار الميل الموجب فإن الراسم يبدأ المسح عندما يتجاوز مستوى الإشارة جهد المستوى (LEVEL Voltage) خلال ارتفاع الإشارة بالاتجاه الموجب وسنوضح مفهوم جهد المستوى بعد قليل.

  أما عند اختيار الميل السالب (negative Slope) فإن المسح يبدأ عند تجاوز جهد المستوى خلال الانخفاض ذي الميل السالب. (انظر الشكل 4-30).

- زر RESET. عند وضع مفتاح نمط القدح Triggering MODE على وضع SINGLE، فإن ضغط زر RESET يُطلق عمل المسح الوحيد (Single Sweep) مع نبضة القدح المتزامنة التالية.

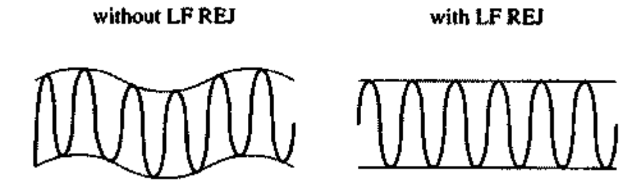
- مبين READY/TRIGGER. عند ضغط زر RESET في حالة العمل بنمط قدح مفرد (SINGLE Trigger mode) تُضاء إنارة دلالة وتدل هذه الإضاءة على بدء المسح وتزول الإضاءة عند انتهاء المسح. تضاء إنارة الدلالة في أنماط المسح NORM، وAUTO، وFIX طيلة فترة استمرار المسح المقدوح. كما تبين لمبة الدلالة أيضاً حالة ضبط المستوى المناسبة للقدح.

- مفتاح المستوى LEVEL ويستخدم لقدح المسح. يُحدد المستوى LEVEL نقطة قدح الراسم بالاعتماد على مطال الإشارة المطبقة، يمكن إزاحة المستوى إلى الأعلى أو الأسفل. تنتقل لمبة (مصباح) دلالة READY/TRIGGER إلى حالة (On) عندما يُقدح المسح، ويدل ذلك على أن مستوى القدح واقع ضمن المجال المناسب (الشكل 14-31).



الشكل (31.14): حالات مختلفة لمستوى جهد القدح.

- مفتاح الربط (COUPLING Switch) ويستخدم لاختيار نوع الربط لإشارة القدح المتزامن وله الحالات التالية:
  - AC وهو النمط أو الحالة الأكثر استخداماً ويسمح بالقدح من 10Hz وحتى 35MHz ويحجب المركبات المستمرة لإشارات القدح المتزامنة.
  - LF REJ. وفي هذه الحالة ترفض الإشارات المستمرة DC وتخمد الإشارات الأخفض من 10kHz ويُقدح المسح فقط بالمركبات عالية التردد من الإشارة. ويستخدم من أجل تأمين قدح مستقر عندما تكون إشارة القدح محتوية إشارات بتردد مساو لتردد الشبكة كالهميم 60Hz.



الشكل (32.14): إشارات قدح مع وبدون LEF REJ.

- HF REJ. تخمد الإشارات ذات الترددات الأعلى من 100kHz، ويستخدم لتخفيض الضجيج عالي التردد أو لإطلاق القدح من الغلاف المعدل (modulated envelop) بدلاً من التردد الحامل.



الشكل (33.14): إشارات توليد القدح مع وبدون HF REJ.

- VIDEO. تُستخدم لإظهار إشارات الفيديو المعقدة، وتستخدم هذه الحالة عند إجراء اختبارات وصيانة لأجهزة التلفزيون وأجهزة الفيديو.
- DC. تسمح بقدح اعتباراً من التردد صفر (DC) إلى ما يزيد عن 35MHz. يمكن استخدام حالة DC لتأمين قدح مستقر لإشارات منخفضة التردد كانت ستخمد فيما إذا قيست بوضع ac. يمكن أن يُضبط المستوى LEVEL لتأمين القدح عند المستوى المستمر المرغوب من الموجة.

6.4.14: القياس برواسم الإشارة

يجب وضع مفاتيح ومقابض وأزرار التحكم بالعمل، الموجودة على واجهة راسم الإشارة، على وضعيات خاصة كي يكون القياس دقيقاً. وإذا كان وضع أحد هذه المفاتيح غير صحيح فإن العمل يضطرب، ولذلك عليك التأكد من وضع كل مفتاح بدقة على الحالة الصحيحة. سنغطي في الصفحات التالية عدداً من استخدامات رواسم الإشارة، وعندما نبدأ بمناقشة استخدام جديد، كقياس فرق الصفحة بين إشارتين، فإننا سنعمد إلى ضبط مفاتيح الراسم على الإعدادات الأولية المبينة بعد قليل، ثم نذكر المفاتيح والأزرار التي يجب ضبطها لوضع الراسم في الحالة المناسبة للاستخدام.

الإعدادات الأولية للراسم

الخطوة الأولى

1. مفتاح التغذية: Off.
2. المسح الارتدادي الداخلي (مفتاح نمط القدح): Off (على وضعية NORM أو AUTO).
3. مفتاح FOCUS: على أخفض وضعية.

4. مفتاح الربح Gain: على أخفض وضعية.

5. مفتاح شدة الإضاءة Intensity: على أخفض وضعية.

6. مفاتيح التحكم بالتزامن (HOLDOFF ،LEVEL): على أخفض وضعيات.

7. ناخب المسح: خارجي (EXT).

8. مفتاح ضبط الموقع العمودي: في الوسط.

9. مفتاح ضبط الموقع الأفقي: في الوسط.

الخطوة الثانية

1. مفتاح التغذية: On.

2. اضبط مفتاح التركيز (FOCUS) حتى تحصل على التركيز المناسب للحزمة.

3. اضبط مفتاح شدة الإضاءة (intensity) حتى تحصل على الإضاءة المرغوبة.

4. ناخب المسح (Sweep selector): داخلي (internal) (استخدم المسح الداخلي الخطي إذا كان لديك في الراسم أكثر من مسح).

5. التحكم بالموقع العمودي: اضبط هذا المفتاح حتى يتمركز خط الإظهار.

6. التحكم بالموقع الأفقي: يُضبط حتى تتمركز الحزمة على شاشة الإظهار.

7. مسح ارتدادي داخلي: On. اضبط تردد المسح على أي تردد أعلى من 100MHz.

8. التحكم بالربح الأفقي: غير وضع هذا المفتاح حتى تتحول النقطة المضيئة إلى خط أفقي، ثم أعد وضع هذا المفتاح إلى أخفض حالة.

9. مسح ارتدادي داخلي: Off.

10. التحكم بالربح العمودي: يُضبط على نقطة وسطى. ضع اصبعك على المدخل العمودي وعندها تلاحظ ظهور إشارة تؤدي إلى انحراف نقطة الإظهار عمودياً فتظهر على شكل خط. تأكد أن طول هذا الخط قابل للضبط بمفتاح التحكم بالربح العمودي. أعد هذا المفتاح إلى أخفض حالة.

11. المسح الارتدادي الداخلي: On، غير وضع مفتاح القاعدة الزمنية (التحكم بالربح الأفقي (horizontal gain control)) حتى تتحول نقطة الإظهار إلى خط أفقي.

قياس إشارة جهد جيبي

1. وصِّل التجيهزات كما في الشكل (14-34).

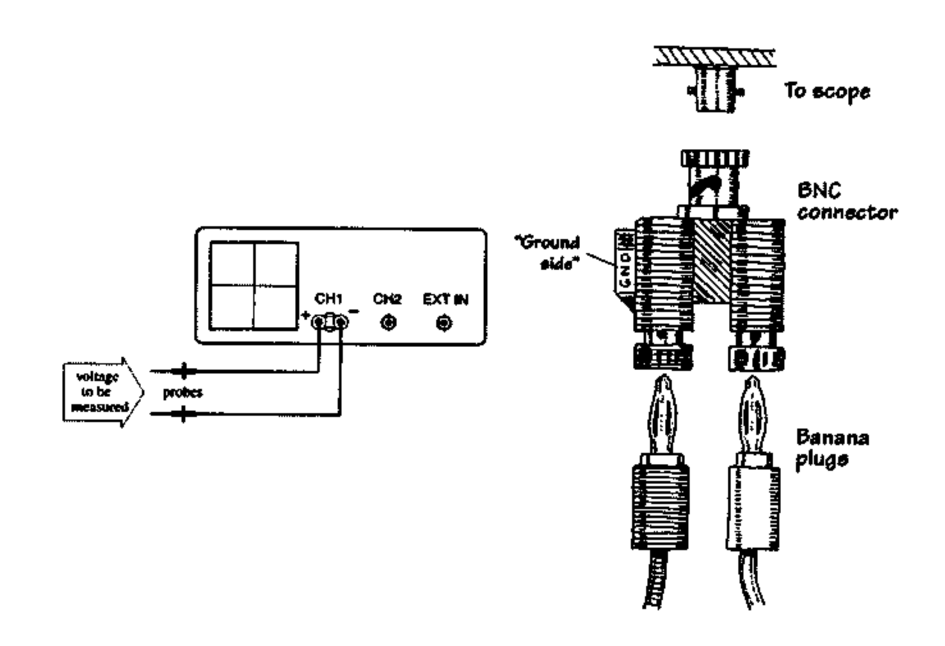
2. اضبط مفاتيح الراسم على الإعدادات الأولية الواردة في فقرة سابقة.

3. غير وضعية مفتاح VOLTS/DIV حتى تظهر الإشارة.

4. ضع ناخب الدخل (input selector)، والذي له الحالات (DC ،GND ،AG) على وضع GND.

5. ضع الراسم على وضعية مسح ارتدادي داخلي، غير وضعية مفتاح SEC/DIV حتى ترسم الحزمة الإلكترونية خطاً على شاشة الإظهار وفي حالتنا هنا تظهر إشارة جيبية على كامل الشاشة بالاتجاه الأفقي لو كان المفتاح في غير وضعية GND.

6. اضبط وضع الخط في وسط الشاشة بواسطة مفتاح التحكم بالموضع العمودي (Vertical Position Knob)، أما إذا اخترت موقعاً آخر للخط فإن القياسات كلها ستكون مزاحة بمقدار معتبر أثناء القياس. إذا حدث لديك شك بأن الإشارة مزاحة للأعلى أو الأسفل، ضع مفتاح ناخب الدخل على وضع GND وأعد الضبط من جديد.
7. ضع مفتاح ناخب الدخل على (DC) وأوصل مجس الراسم إلى مصدر الإشارة المقاسة.
8. اضبط مفاتيح VOLTS/DIV وSEC/DIV بحيث تظهر الإشارة بالشكل الذي يناسبك.
9. بعد ظهور الإشارة سجل وضعيات المفاتيح VOLTS/DIV وSEC/DIV. أجرِ قياساً للدور، والدور هو المسافة الفاصلة بين قمتين (على المحور الأفقي كما في الشكل 14-35).



الشكل (34.14): توصيلات الاجهزة لقياس إشارة جهد جيبي.

وكذلك أجرِ قياساً للجهد من القمة إلى القمة باستخدام شبكة المربعات الموجودة على الشاشة، ولكي تحصل على القراءات الصحيحة للجهد والدور اضرب القراءات بوضعيات المفاتيح وعندها يمكنك حساب الدور والتردد والقيمة الفعالة لجهد الإشارة الجيبية كما يلي:

$$V_{pp} = (6cm) \times (\frac{2V}{1cm}) = 12V$$

$$V_{rms} = \frac{1}{2\sqrt{2}} V_{pp} = 4.25V$$

$$T = (4cm) \frac{10ms}{1cm} = 40ms$$

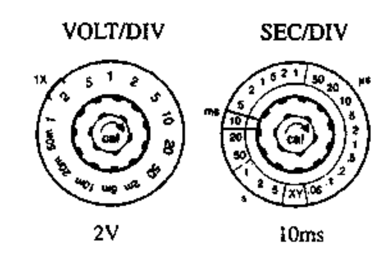
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{40ms} = 25Hz$$

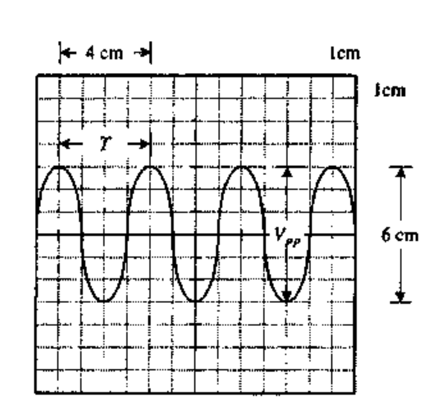
V_{pp}: جهد الإشارة من القمة إلى القمة.

V_{rms}: القيمة الفعالة (المنتجة) لجهد الإشارة الجيبية.

T: الدور Period.

F: التردد Frequency.





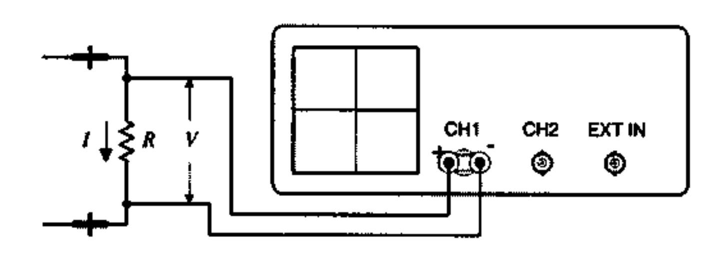
الشكل (35.14): قياسات الجهد والتردد لإشارة جيبية.

قياس التيار

إن رواسم الإشارة مصممة لقياس الجهود، وهي لا تستطيع قياس التيار قياساً مباشراً، ولكن يمكن إجراء قياس للجهد الناتج عن مرور التيار المراد معرفته عبر مقاومة. يُطبق قانون أوم فيما بعد لحساب التيار (I=V/R)، وعادة يتم اختيار قيمة المقاومة بحيث تكون صغيرة كي لا تغير شروط عمل الدارة الأساسية، وغالباً تستخدم مقاومة (1Ω) عالية الدقة لهذا الغرض.

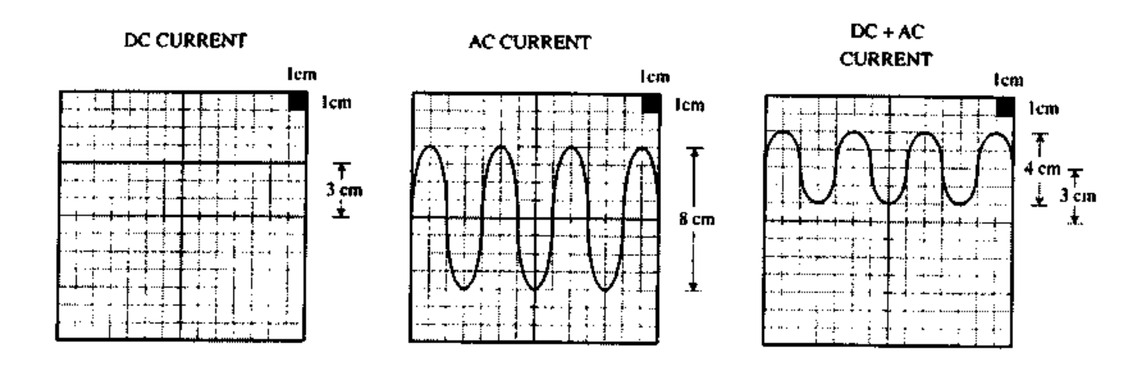
ونبين فيما يلي خطوات قياس التيار بواسطة راسم الإشارة (قياساً غير مباشر):

1. أوصل التجهيزات كما في الشكل (14-36).



الشكل (36.14): توصيلات راسم الإشارة لقياس جهد مقاومة.

2. ضع الراسم على الإعدادات الأولية.
3. مرر التيار المطلوب قياسه عبر مقاومة تساوي 1Ω، يجب أن تكون المقاومة من صنف يتحمل تبديد استطاعة تساوي قيمة المقاومة (1Ω) مضروبة بمربع التيار المتوقع، فإذا كان التيار المتوقع مثلاً يساوي (0.5A) فإن معدل استطاعة المقاومة سيكون $(1/4W) = (0.5A)^2$.
4. أجر قياساً للجهد الهابط على المقاومة بواسطة راسم الإشارة. إن قيمة التيار المطلوب تساوي قراءة الجهد لأن المقاومة تساوي (1Ω). يبين الشكل (14-37) أمثلة على قياسات مختلفة أحدها (في اليسار) لتيار مستمر، والآخر في الوسط لتيار متناوب، والأخير في اليمين لتيار مستمر ومتناوب (تيار متناوب محمول على تيار مستمر).



الشكل (37.14): قياسات غير مباشرة للتيار بواسطة راسم إشارة.

في الشكل اليساري: 20mV/DIV , R= 1Ω

$$I = \frac{V}{R} = \frac{3cm(20mV)/DIV}{1\Omega} = 60\,mA$$

في الشكل المتوسط: R = 1Ω, 2mV/DIV

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{8cm(2mV)/DIV}{2\sqrt{2}(1\Omega)} = 5.65\,mA$$

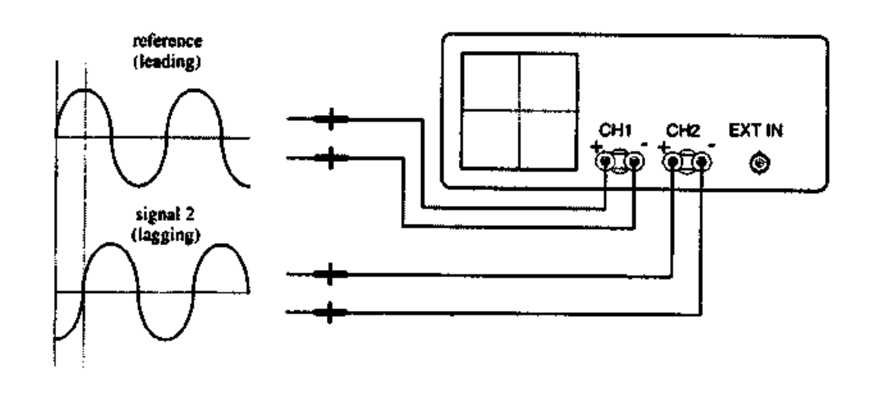
في الشكل اليميني: R = 1Ω, 1mV/DIV

$$I_{tot} = \sqrt{I_{rms}^2 + I_{dc}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{(4cm)(1mV/cm)}{(2)(1\Omega)}\right)^2 + \left(\frac{(3cm)(1mV/cm)}{1\Omega}\right)^2} = 3.31mA$$

قياسات الصفحة بين إشارتين

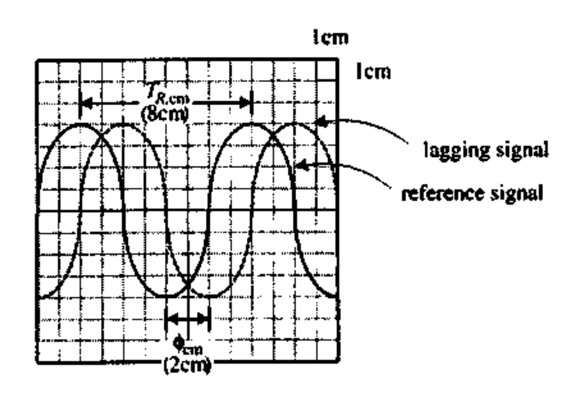
شغل راسم الإشارة للعمل بقناتين (DUAL أو BOTH) عندما ترغب في قياس فرق الصفحة بين إشارتين، ثم طبق الإشارة الأولى على القناة CH_1، والإشارة الثانية على القناة CH_2 فتظهر الإشارتين في نفس الوقت على شاشة الراسم، وإليك خطوات القياس.

1. أوصل التجهيزات كما في الشكل (14-38).



الشكل (38.14): توصيلات راسم الإشارة لقياس فرق الصفحة.

2. ضع راسم الإشارة على الإعدادات الأولية، ويجب أن تكون مجسات القياس قصيرة ولها نفس الطول ولها نفس المواصفات الكهربائية لأن عدم التطابق في الطول، وفي المواصفات الكهربائية يؤدي إلى إزاحات صفحة إضافية عند العمل على ترددات عالية.
3. ضع مفتاح المسح الارتدادي الداخلي على حالة On.
4. شغل الراسم بنمط ثنائي DUAL.
5. اضبط مفاتيح VOLTS/DIV للقناتين بحيث تظهر الإشارتان بنفس المطال، كما في الشكل (14-39)، لأن ذلك يجعل القياس أسهل.
6. حدد عامل الصفحة للإشارة المرجعية، فإذا كان دور كامل من الإشارة يشغل (8cm) فإن الـــ 8cm تعادل (360°)، وكل (1cm) يعادل (45°) ونسمي الـــ (45°) في هذه الحالة باسم عامل الصفحة (Phase factor).
7. أجرِ قياساً للمسافة بين نقطتين متوافقتين من الموجتين (المسافة تقاس على المحور الأفقي)، كأن تقيس المسافة مثلاً بين قمم الإشارات. اضرب المسافة المقاسة مقدرة بالـــ (cm) بعامل الصفحة فنحصل على فرق الصفحة (انظر الشكل 14-39). إذا كانت المسافة المقاسة بين قمتي الإشارتين تساوي (2cm) مثلاً، فإن فرق الصفحة سيكون (2x45°=90°).



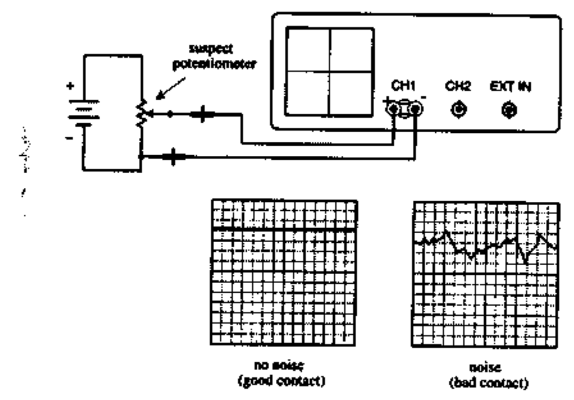
الشكل (39.14): قياس فرق الصفحة بواسطة راسم إشارة.

7.4.14: تطبيقات رواسم الإشارة

إن قدرة راسم الإشارة على تجميد (freez) الإشارات عالية التردد يجعله أداة مفيدة جداً لاختبار العناصر والدارات الإلكترونية التي تعتبر مميزاتها الزمنية، وعلاقاتها الصفحية والزمنية هامة جداً. يمكن استخدام راسم الإشارة مثلاً لدراسة موجة مربعة، أو سن منشارية أو غيرها من الموجات مختلفة الأشكال، كما أنه يستخدم لقياس الضجيج الساكن (Static noise) مثل تغيرات التيار الناتجة عن التوصيلات الضعيفة (Poor Connections) بين العناصر، كما يمكن استخدامه أيضاً لدراسة تأخير النبضات، والإشارات الرقمية، وغيرها من التطبيقات العديدة جداً، ونبين فيما يلي بعض تطبيقات الرواسم.

اختبار الضجيج الساكن لمقسمات الجهد

يستخدم راسم الإشارة كما في الشكل (14-40) لمعرفة مدى جودة الذراع المنزلق في مقاومة متغيرة (مقسم جهد)، فإذا كان الذراع جيداً نحصل على خط متصل على شاشة الراسم، أما إذا كان سيئاً فإننا نحصل على تعرجات وتموجات كما في الشكل. وقبل أن نقرر أن الذراع المنزلق سيء علينا أولاً أن نتأكد أن الضجيج لم يكن موجوداً بالأساس وإنما هو ناتج عن ضعف التماس بين الذراع المنزلق وجسم المقاومة، وللتأكد من ذلك عليك التأكد من جودة أسلاك التوصيل ومجسات القياس.



الشكل (40.14): استخدام راسم إشارة لاختبار ضجيج مقسم جهد.

القياسات على النبضات

تستخدم رواسم الإشارة غالباً لدراسة التغيرات التي تطرأ على النبضة بعد مرورها في دارة، وتبين التعاريف والشكل التالية بعض التغيرات التي يمكن أن تحدث لنبضة جراء مرورها في دارة معينة.

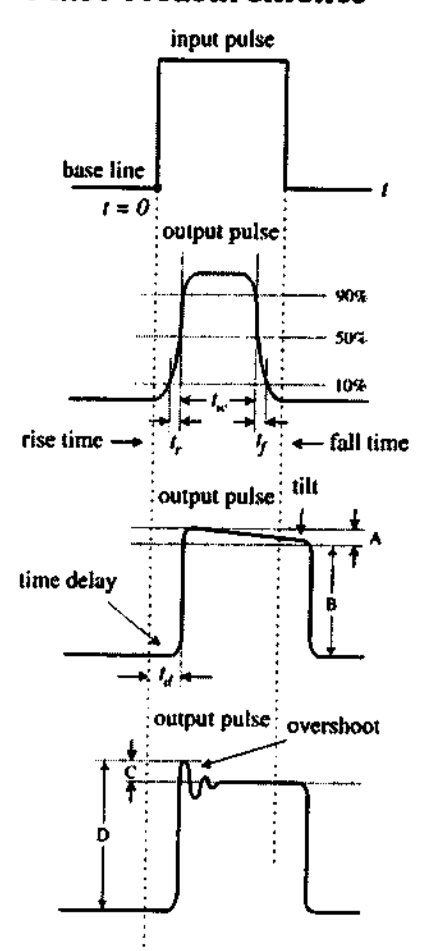
وصف النبضة

- زمن الصعود Rise Time (t_r): هو المجال الزمني الذي ترتفع فيه النبضة من مستوى (10%) إلى مستوى (90%) من قيمتها العظمى.
- زمن الهبوط Fall Time (t_f): هو المجال الزمني الذي يتغير فيه جهد النبضة من نسبة (90%) إلى نسبة (10%) من القيمة العظمى.
- عرض النبضة Pulse width: هو المجال الزمني بين قيمتي الـــ (50%) من الجهد الأعظمي للنبضة.
- التأخير الزمني للنبضة Time delay (t_d): هو المجال الزمني بين لحظة بدء نبضة الخرج (t=0) واللحظة التي يكون فيها مستوى النبضة أعلى بـــ (10%) من القيمة العظمى للنبضة.
- انحدار (انخفاض) حافة النبضة Tilt: مقدار انخفاض حافة (جبهة) النبضة ويُعطى عادة كنسبة مئوية:

$$\text{Percent tilt} = \frac{A}{B} \times 100\%$$

- تجاوز المستوى الأعظمي للنبضة Overshoot: وهو عبارة عن مقياس لمدى زيادة قيمة النبضة في الخرج عن القيمة العظمى لنبضة الدخل ويُعطى كنسبة مئوية:

$$\text{Percent Overshoot} = \frac{C}{D} \times 100\%$$

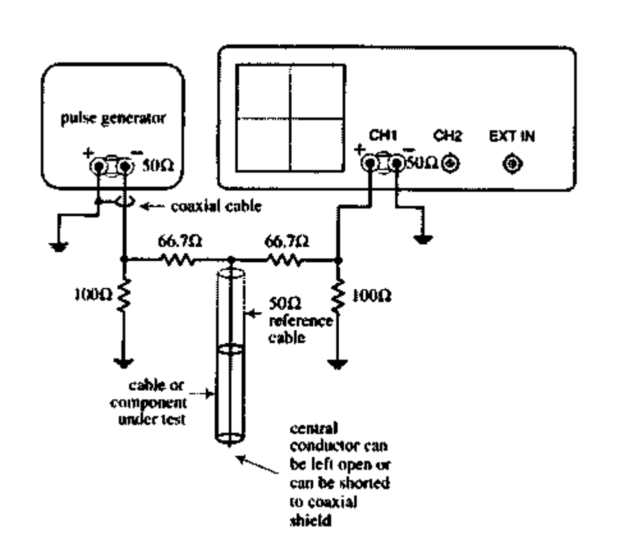


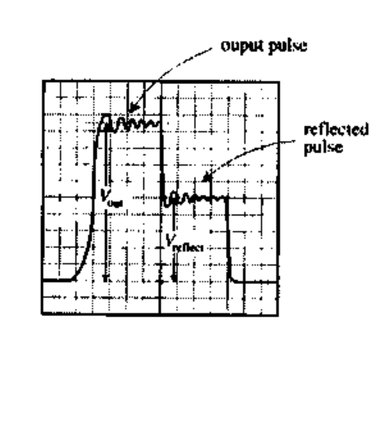
الشكل (41.14): أشكال مختلفة لنبضات.

قياس الممانعات

تعتمد طريقة القياس هذه على المقارنة بين النبضة المنعكسة (reflected pulse) ونبضة الخرج (Output pulse)، فعند مرور نبضة عبر خط نقل، فإن جزءاً من الإشارة ينعكس عائداً إلى طرف مصدر الإشارة بسبب عدم توافق الممانعة. للخط ممانعة مميزة (Characteristic impedance)، فإذا كانت ممانعة الخط أكبر من ممانعة مصدر الإشارة فإن الإشارة المنعكسة (reflected signal) سوف تكون معكوسة، أما إذا كانت ممانعة المصدر أكبر من ممانعة الخط فإن الموجة المنعكسة لن تكون منعكسة.

1. أوصل الأجهزة كما في الشكل (14-42).





الشكل (42.14): توصيلة راسم الإشارة لقياس الممانعة.

2. ضع مفاتيح وأزرار راسم الإشارة على حالة الإعداد الأولي.
3. ضع مفتاح المسح الارتدادي الداخلي على حالة On.
4. ضع ناخب المسح على حالة INTERNAL.
5. ضع ناخب التزامن على وضع INTERNAL.
6. شغل مولد النبضات.
7. غير وضعيات مفتاح SEC/DIV وVOLT/DIV حتى تظهر نبضة الخرج.
8. لاحظ نبضة الخرج والنبضة المنعكسة على شاشة الراسم، قس جهد الخرج (V_{out}) وجهد النبضة المنعكسة ($V_{reflected}$).
9. استخدم المعادلة التالية لمعرفة الممانعة المجهولة:

$$Z = \frac{50\Omega}{2V_{out} / V_{reflected}} - 1$$

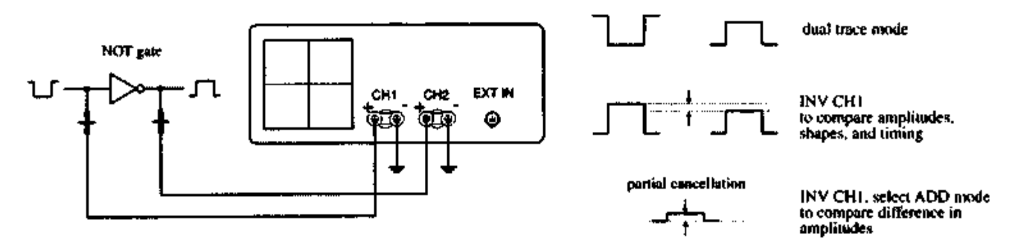
الممانعة المميزة لخط النقل المعياري هي 50Ω.

التطبيقات الرقمية

تبين الأشكال التالية بعض استخدامات راسم الإشارة في مراقبة الدارات الرقمية ففي الشكل (14-43) تُعطى توصيلة مراقبة نبضات الدخل والخرج.

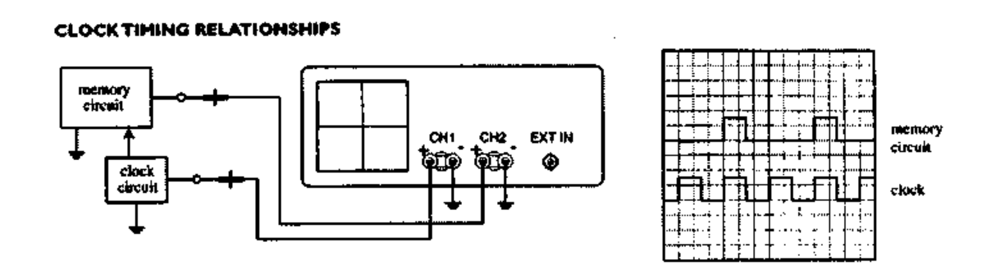
العلاقة بين الدخل/والخرج

تبين الدارة في الشكل (14-43) نبضات دخل وخرج بوابة عاكس ويشغل راسم الإشارة للعمل بقناتين إحداهما لنبضة الدخل والأخرى لنبضة الخرج فتظهر النبضات كما هو مبين على يمين الراسم في الأعلى. إذا تم الضغط على زر عكس القناة الأولى INV CH1 تظهر النبضات كما هو مبين في الوسط على يمين راسم الإشارة، ويمكن هنا مقارنة المطالات وأزمنة الصعود والهبوط. يمكن معرفة الفرق في المطال بضغط زر ADD.



الشكل (43.14): استخدام راسم إشارة لمعرفة العلاقة بين نبضات الدخل والخرج.

العلاقات بين التوقيت ونبضات Clock



الشكل (44.14): نبضات Clock ونبضات دارة ذاكرة.

علاقات التقسيم الترددي

FREQUENCY-DIVISION RELATIONSHIPS

CH1 CH2 EXT IN

divide by 2 circuit

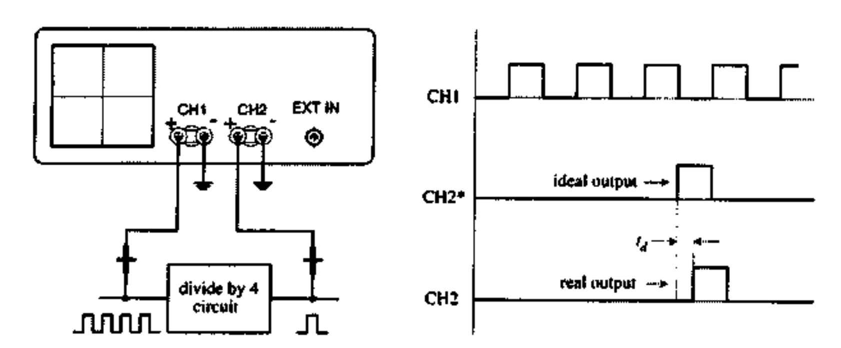
CH1 — reference frequency

CH2 — output synchronized with leading edge

(CH2) — output synchronized with trailing edge

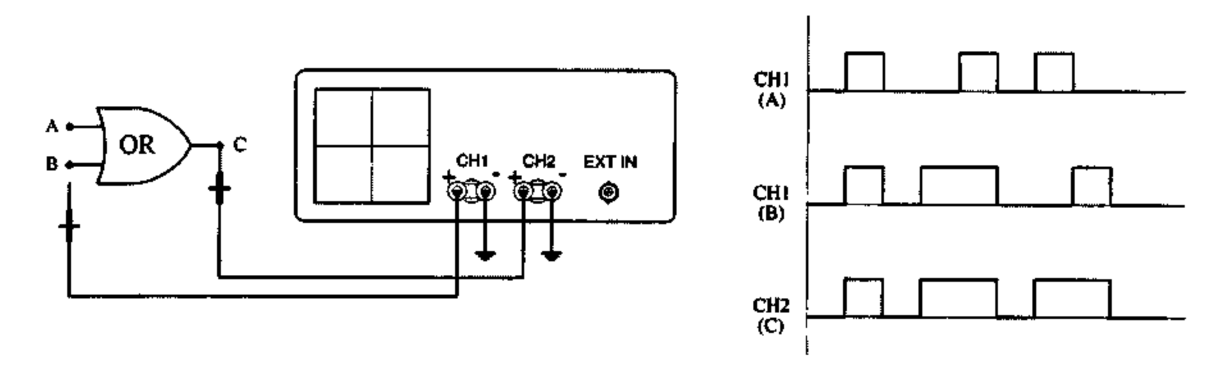
الشكل (45.14): تردد مرجعي، خرج متزامن مع الجبهة الصاعدة، خرج متزامن مع الجبهة الهابطة.

اختبار تأخير الانتشار (التأخير الزمني)



الشكل (46.14): نبضات Clock لدخل مقسم على (4)، خرج مثالي، وخرج مؤخر.

اختبار الحالات المنطقية



الشكل (47.14): الحالات المنطقية لنبضات مداخل وخرج بوابة NOR.


https://maktbah.net





توزيع الطاقة والتوصيلات المنزلية

1.A: توزيع الطاقة

يبين الشكل (1.A) نظاماً تقليدياً لتوزيع الطاقة مستخدماً في كاليفورنيا (California) في الولايات المتحدة الأمريكية (United States)، والجهود المبينة علي المخطط هي جهود جيبية وتمثل هذه الجهود بالقيم المنتجة (rms values). قد يكون نظام التوزيع الموجود في بلادك مختلفا عن هذا النظام، ولمعرفة تفصيلات نظام التوزيع في منطقتك عليك الاستفسار من الجهة المسؤولة عن نظام التوزيع المستخدم لديك.

يستخدم الجهد المتناوب (ac) في توزيع القدرة الكهربائية بدلاً من الجهد المستمر (dc) لأن الجهد المتناوب يمكن رفعه أو خفضه بواسطة محولات، فمن الأفضل والأكثر كفاءة نقل القدرة الكهربائية المتناوبة عبر خطوط نقل على شكل جهد عالٍ وتيار منخفض، لأن تخفيض التيار يؤدي إلى تخفيض الضياعات الحرارية الناتجة عن المقاومات الأومية للخطوط حسب القانون $P=I^2.R$. وعندما تصل الكهرباء إلى محطة فرعية (Substation) يتم تخفيضها إلى مستوى آمن قبل دخولها إلى المنازل والورشات والمصانع. تستخدم القدرة الكهربائية ثلاثية الطور (three-phase electricity) في الصناعة. إن التتالي الطبيعي للأطوار الثلاثة مفيد جداً للأجهزة الكهربائية مثل المكيفات، والمخارط (Lathes)، والمطاحن وأجهزة التلحيم وغيرها من الأجهزة الكهربائية عالية القدرة. من المعروف في الجهود ثلاثية الطور أن قيم جهود الأطوار لا تكون متساوية في لحظة ما بسبب الاختلاف الصفحي بين الأطوار. يعتبر نظام القدرة الكهربائية ثلاثية الأطوار مفيداً لأنه في حال انقطاع أحد الأطوار تبقى الأطوار الأخرى موجودة ويمكن تغذية التجهيزات الكهربائية منها.

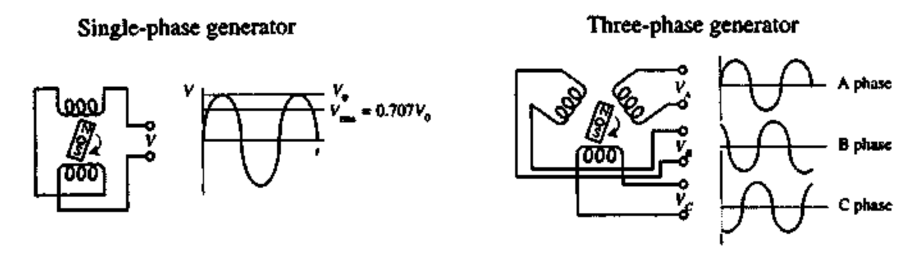
2.A: الكهرباء ثلاثية الطور

يمكن استخدام المولد البسيط المبين في الشكل (2.A) لتوليد جهد أحادي الطور، فعندما يدور المغناطيس باستخدام قوة ميكانيكية يتحرض جهد ضمن الملفات بفرق صفحة (180°) وتكون النتيجة جهداً جيبياً وحيداً ويتم عادة التعبير عن جهد الخرج بقيمته المنتجة $V_{rms} = (1/\sqrt{2})(V_0)$.

أما في المولد ثلاثي الطور فيتم توليد ثلاثة جهود منفصلة باستخدام ثلاثة ملفات ويكون فرق الصفحة بين الجهود (120°)، وعندما يدور المغناطيس يتحرض جهد على طرفي كل ملف وكافة جهود الملفات تكون متساوية المطال ولكنها مزاحة عن بعضها بالصفحة بمقدار (120°). يمكنك تغذية ثلاثة أحمال متساوية المقاومات من هذا المولد، أو يمكنك تشغيل محرك ثلاثي الطور له توصيلة ملفات مشابهة ولكن ذلك يحتاج كما ترى لستة أسلاك منفصلة ولذلك تستخدم طريقتان لتخفيض عدد الأسلاك وتعتمد الطريقة الأولى على ترتيب ملفات الأطوار الثلاثة بتوصيلة تسمى توصيلة دلتا

(delta Connection) وتحتاج هذه التوصيلة إلى ثلاثة أسلاك فقط. أما الطريقة الثانية فتستخدم التوصيل النجمي أو التوصيل (Y) للملفات وتحتاج إلى أربع أسلاك، ونتعرف فيما يلي على توصيلات دلتا و(Y).

الشكل (1.A): نظام توزيع قدرة.

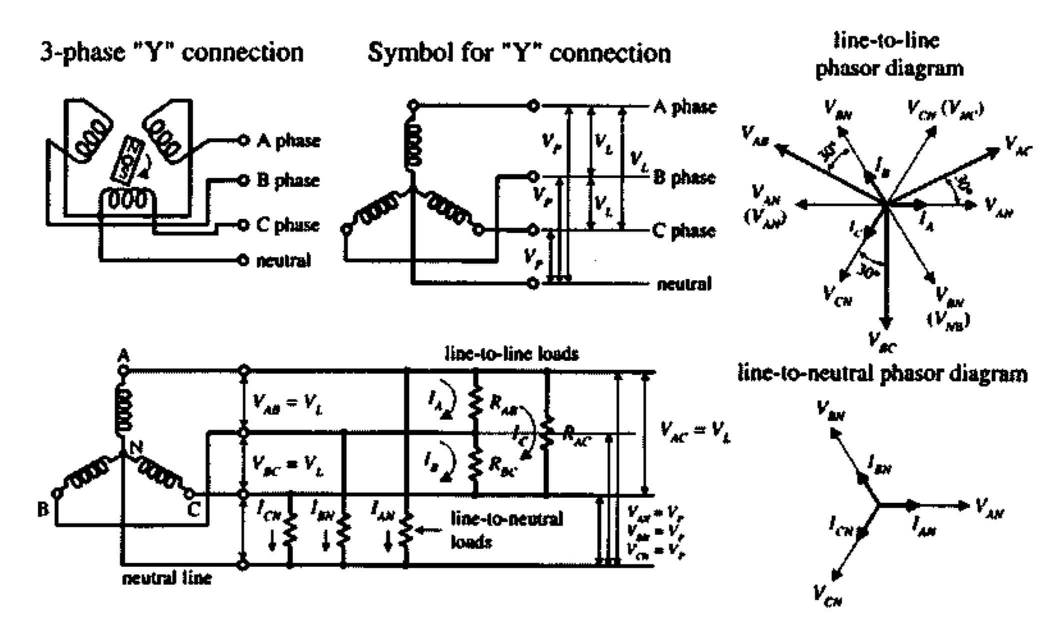


الشكل (2.A): مولدات بسيطة أحادية وثلاثية الطور.

التوصيل (الربط) Y

يتم تحقيق هذا النوع من الربط بوصل نهايات الملفات مع بعضها وتكون هذه النهايات خطاً واحداً يسمى الخط الحيادي (neutral)، أما الأطراف الثلاثة الأخرى للملفات فيتم إخراجها بثلاثة خطوط، كل خط بمفرده ويسمى كل خط منها باسم الخط الساخن (hot lead). يُسمى الجهد بين الخط الحيادي وأي من الخطوط الثلاثة باسم جهد الطور (phase voltage) ويرمز له بالرمز (V_P)، أما الجهد الكلي (total voltage) أو جهد الخط (line voltage) فهو الجهد بين خطين ساخنين ويرمز بالرمز (V_L) وقيمة جهد الخط هي حاصلة الجمع الشعاعي لجهود الأطوار. وفي دارة Y المحملة يُطبق على كل حمل جهد طورين على التسلسل وهذا يعني أن التيار والجهد في الحمل يجب تحديدهما بالجمع الشعاعي لجهود وتيارات الأطوار. ويمكن معرفة التيار والجهد بواسطة المخطط الشعاعي، كما هو موضح في الشكل وعملياً يكون جهد الخط مساوياً ($\sqrt{3}$) مضروباً بجهد الطور.

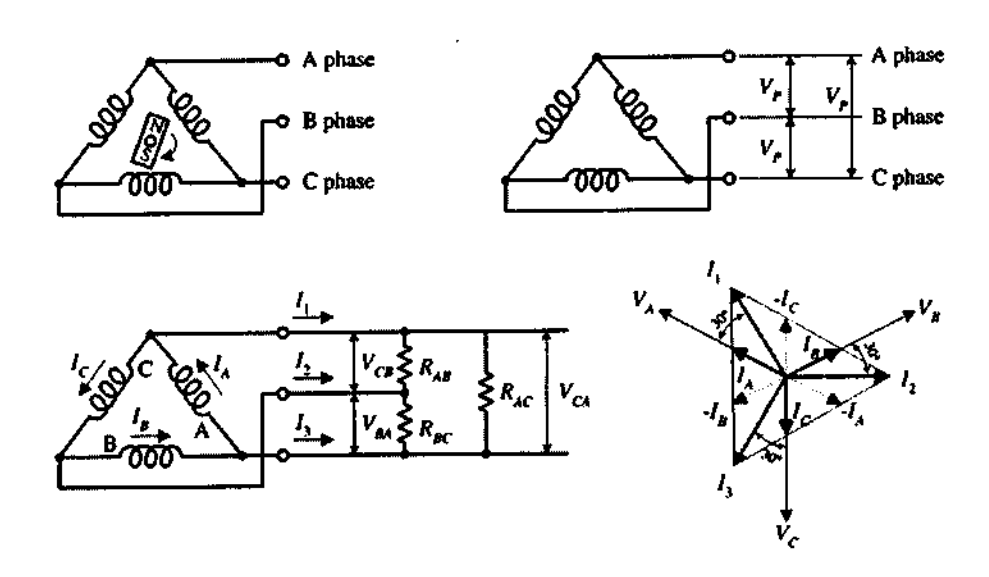
يوجد فرق صفحة قدره (30°) بين تيار الخط وجهد الخط. عند استخدام الخط الحيادي يكون تيار الخط مساوياً تيار المولد وكذلك يكون جهد الخط مساوياً للجهد الناتج عن المولد. وعندما تكون الأحمال متساوية لا يمر أي تيار عبر الخط الحيادي ويسمى الحمل في هذه الحالة باسم الحمل المتوازن (balanced Load).



الشكل (3.A): الربط النجمي (Y) للجهد ثلاثي الطور.

التوصيل دلتا

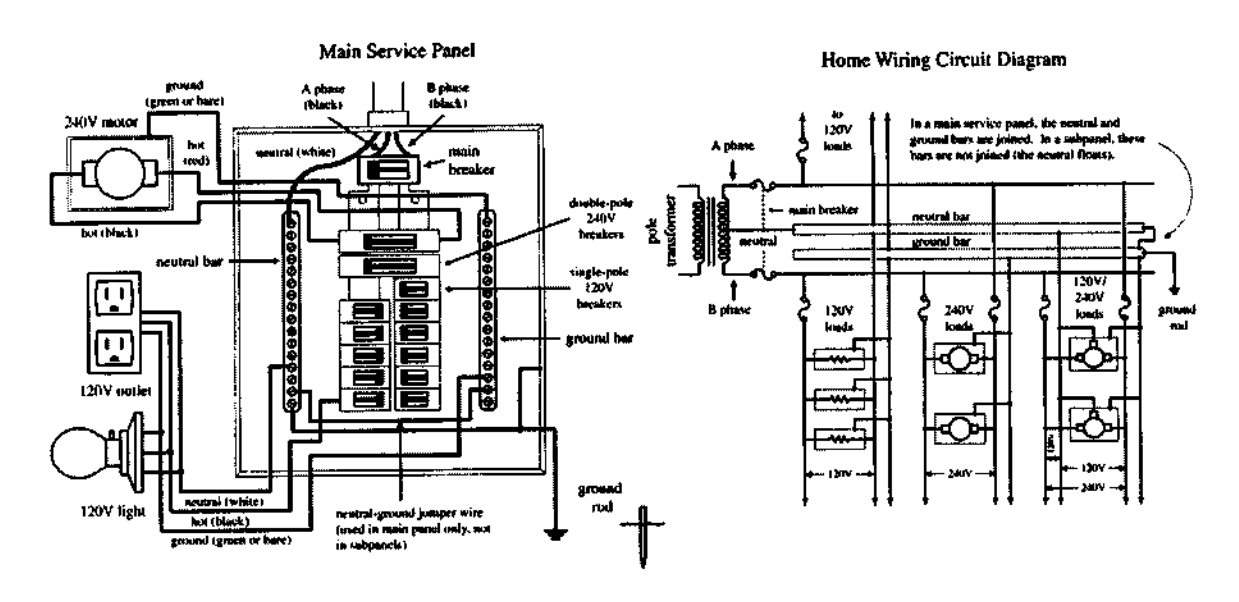
يتم تحقيق التوصيل دلتا بوصل نهايات ملفات المولد الثلاثة (نهاية مع نهاية) (end-to-end) كما في الشكل وبما أن التوصيل دلتا ليس فيه خط حيادي فإن جهود الأطوار (phase voltages) مساوية لجهود الخطوط (line voltages) ويختلف جهد كل خطين عن بعضهما بالصفحة وفرق الصفحة بين كل خطين يساوي (120°)، ولكن وبعكس التوصيل (Y) فإن تيارات الخطوط (I_1, I_2, I_3) تساوي المجموع الشعاعي لتيارات الأطوار (I_A, I_B, I_C)، وعندما تكون الأطوار محملة بالتساوي، تكون التيارات متساوية وبينها فرق صفحة يساوي (120°). يختلف تيار الخط عن جهد الخط بالصفحة بمقدار (30°)، وقيمة تيار الخط تساوي $\sqrt{3}$ مضروباً بتيار الطور.



الشكل (4.A): التوصيل دلتا للجهد ثلاثي الطور.

3.A: التوصيلات المنزلية

تصل في الولايات المتحدة الأميريكية ثلاثة أسلاك من المحول القطبي (Pole Transformer) والذي يسمى أيضاً الصندوق الأخضر (green box) إلى لوحة الخدمة الأساسية (main service panel) في بيت المستثمر. أحد الأسلاك هو الطور (A) ولونه أسود والآخر هو الطور (B) ولونه أسود أيضاً، أما السلك الثالث فهو السلك الحيادي (ولونه أبيض) ويبين الشكل (5.A) المصدر الأصلي لهذه الأسلاك وهو المحول القطبي أو الصندوق الأخضر. تبلغ قيمة الجهد بين الطور (A) والطور (B) أو بين الخط الساخن الأول والخط الساخن الثاني (240V)، أما الجهد بين الطور (A) والخط الحيادي، أو بين الطور (B) والخط الحيادي فهو (120V). هذه الجهود اسمية ويمكن أن تتغير من منطقة إلى منطقة.



الشكل (5.A): مخطط الدارة الكهربائية للتوصيلات المنزلية، لوح التوزيع الأساسي.

توصل الأسلاك الثلاثة في البيت إلى مقياس استطاعة (Watt meter) ثم تدخل إلى لوح الخدمة الأساسية المؤرض بواسطة ناقل نحاسي طويل موصول مع الأرض. توصل خطوط الأطوار (A) و(B) التي تدخل لوح الخدمة الأساسي عبر قاطع أساسي للفصل (main disconnect breaker)، أما الخط الحيادي فيوصل إلى طرفية تسمى الممر الحيادي (neutral bus) أو القضيب الحيادي (neutral bar)، وقد يوجد أيضاً قضيب تأريض (ground rod). يوصل قضيب التأريض وقضيب الخط الحيادي مع بعضهما في لوحة الخدمة الأساسية ليشكلا قضيباً واحداً، أما في اللوحات الفرعية (التي تأخذ تغذيتها من اللوحة الأساسية فإن هذه القضبان تكون مفصولة عن بعضها (لا توصل مع بعضها)، وبدلاً عن الوصل فإن خط (قضيب) التأريض في اللوحة الفرعية يوصل بواسطة خط خاص مع قضيب التأريض في اللوحة الأساسية، وغالباً ما يستخدم المجرى المعدني الذي ينقل الأسلاك من اللوحة الأساسية إلى اللوحة الفرعية كخط أرضي (ground wire)، وأما في بعض الحالات الأخرى فإن خط التأريض يكون مع باقي الأسلاك ضمن المجرى المعدني. إذا كانت اللوحة الفرعية غير موجودة في نفس البناء، يستخدم وتد تأريض جديد لتأريض اللوحة الفرعية. من الجدير بالذكر هنا أن مناطق مختلفة في الولايات المتحدة قد تستخدم طرقاً وأصولاً أخرى في التوصيل، ولذلك لا يجب أخذ ما هو مذكور هنا عن التوصيل كمعيار عملي دائم، ويجب في حال الضرورة معرفة طريقة التوصيل المستخدمة لديك من الجهات ذات العلاقة. يوجد في لوحة الخدمة الأساسية قضيبا توزيع (bus bars) توصل إليهما قواطع (breakers)، وأحد هذه الموزعات موصول مع الطور (A)، والآخر موصول مع الطور B. عند الرغبة في تغذية أحمال الـ (120V) بالطاقة يوضع القاطع الرئيسي على حالة (Off)، ثم يوصل القاطع وحيد القطب مع أحد قضبان التوزيع (bus bars)، ويمكن اختيار قضيب توزيع الطور (A) أو الطور (B)، ولا فرق نهائياً بينهما إلا عند ضرورة تحقيق توازن في التحميل. بعد ذلك يؤخذ كابل ثلاثي الأسلاك مخصص للجهد 120V ويوصل الخط الأسود في الكابل مع القاطع والخط الأبيض في الكابل مع القضيب الحيادي في اللوحة ويوصل سلك التأريض في الكابل (لونه أخضر أو عار من العازل) إلى قضيب التأريض. يوصل الطرف الآخر للكابل إلى مكان وصل الأحمال. يوصل الحمل بين الخطين الأسود والأبيض، أما الخط الأخضر فيوصل إلى جسم الجهاز، وعادة تجهز المآخذ ببرغي لوصل خط التأريض، كما يوضع برغي خاص بنمط التأريض في سوكة مصباح الإنارة مثلاً. تغذى باقي أحمال الـ (120V) بنفس الطريقة، ويمكن أن يكون لهذه الأحمال قواطعها الخاصة، ومن الضروري مراعاة التوازن في التحميل بين الطور (A) والطور (B) ويسمى هذا العمل بموازنة الحمل (Load balancing).

توصل التغذية الكهربائية 240V إلى أحمالها (كالأفران والغسالات مثلاً) عن طريق قاطع ثنائي القطب (double-pole breaker) حيث يوصل القاطع مع الطور A ومع الطور B ثم يؤخذ كابل (240V) بثلاثة أسلاك فيوصل السلك الأسود الأول إلى خرج الطور (B) من القاطع والسلك الأسود الثاني إلى خرج الطور (A) من القاطع، أما الخط الأخضر أو خط التأريض فيوصل مع قضيب التأريض في اللوحة الأساسية ثم يمد الكبل إلى مكان الاستخدام حيث توصل نهاياته مع مآخذ 240V، أما الأحمال التي تغذى بطاقة (120/240V) فإن الطاقة توصل إليها بكابل مكون من أربعة أسلاك وأحد هذه الأسلاك هو الخط الحيادي الأبيض الذي يربط مع القضيب الحيادي في اللوحة الأساسية، ويمكن أيضاً استخدام كابل بأربعة أسلاك لتغذية الأحمال 240V بدلاً من كابل ثلاثي الأسلاك ويترك الخط الحيادي دون وصل.

وكتحذير لا ننصح بأن تقوم بنفسك بتنفيذ هذه التوصيلات إلا إذا كنت قادراً على ذلك من الناحية الفنية ولديك كل المعرفة اللازمة للقيام بالعمل. كما ينصح دوماً بفصل القاطع الرئيسي عند القيام بإجراء توصيلات مع لوحة التوزيع الكهربائية الأساسية في المترل.

أما عند إجراء توصيلات أو إصلاحات لتوصيلات مآخذ أو إنارة موصولة إلى قاطعها الخاص عليك فصل هذا القاطع عند القيام بالإصلاح أو الوصل ثم إعادة القاطع إلى وضعه بعد الانتهاء من العمل وينصح دوماً بتعليم هذا القاطع بشريط لاصق كي لا يحدث خطأ كأن تعود وتفصل قاطعاً آخر إذا كان الاختبار الأول للإصلاحات غير ناجح.

4.A: الكهرباء في دول أخرى

تغذى المنازل في الولايات المتحدة الأميركية بجهد أحادي الطور 120V تردده (60Hz)، أما المنشآت الصناعية فتغذى بجهد ثلاثي الطور تردده 60Hz ومقداره 208V/120V. أما أغلب دول العالم الأخرى فإن جهد الشبكة أحادي الطور هو 230V والتردد 50Hz أما الجهد ثلاثي الطور فيبلغ (415V). إذا أردت أن تأخذ جهازاً كهربائياً مصمماً للعمل في الولايات المتحدة (120-V, 60Hz) إلى النرويج التي تستخدم جهداً أحادي الطور 230V ستلاحظ أنك كي توصل الجهاز إلى المآخذ الكهربائي لابد لك من أداة موافقة لأن أشكال المآخذ عندهم مختلفة.

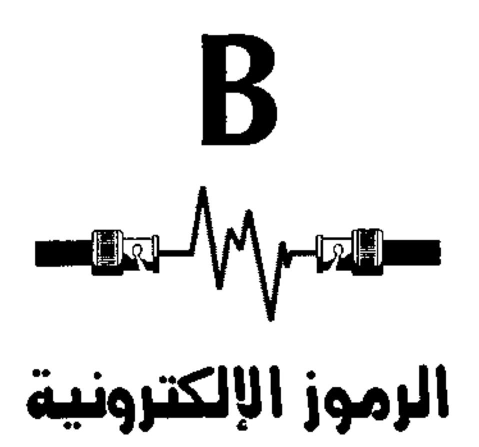
وعندما تجد هذه الأداة عليك أن تفكر قبل وصل الجهاز مع المأخذ لأن الجهاز قد يتعطل، لأن بعض الأجهزة لا تعمل إلا عند الجهد والتردد الأساسي الذي صممت من أجله، ولذلك عليك استخدام محول خافض للجهد من 230V إلى 120V ولكن تبقى لديك مشكلة التردد فهو 50Hz في النرويج إلا أن التردد لا يسبب خللاً في عمل أغلب الأجهزة الكهربائية، لأن الفارق بسيط ويساوي فقط 10Hz، أما بعض الأجهزة كأجهزة التلفزيون ومسجلات الفيديو فقد لا تعمل بشكل صحيح تماماً عند اختلاف تردد جهد الشبكة.

يبين الشكل (6.A) جدولاً بجهد الشبكة الكهربائية وترددها في بعض دول العالم وأشكال بعض المآخذ والمقابس المستخدمة، كما يوجد في الجدول حقل خاص بأنواع المآخذ المستخدمة في الدول المذكورة في الجدول.

Country	Voltage V	Frequency Hz	Plug Type
Australia	240	50	I
Belgium	230	50	C, E
Brazil	110/220	60	A, B, C, D, G
Canada	120	60	A, B
Chile	220	50	C, L
China	220	50	I
Congo	230	50	C, E
Costa Rica	120	60	A, B
Egypt	220	60	C
France	230	50	C, E, F
Germany	230	50	F
Hong Kong	230	50	D, G
India	230	50	C, D
Iraq	220	50	C, D, G
Italy	127/220	50	F, L
Japan	100	50/60	A, B
Korea	110/220	60	A, B, D, G, I, K
Mexico	127	60	A
Netherlands	230	50	C, E
Norway	230	50	C, F
Philippines	110/220	60	A, B, C, E, F, I
Russia & former Soviet Republics)	220	50	C, F
Spain	127/220	50	C, E
Switzerland	220	50	C, E, J
Taiwan	110	60	A, B, I
US	120	60	A, B
United Kingdom	230	50	G

A B G C H D I E J K F L

الشكل (6.A): جدول جهود المآخذ وتردداتها وانواعها في بعض دول العالم.



غير موصول
unconnected

موصول
connected

potentiometer
مقاومة متغيرة

polarized capacitor
مكثف مستقطب

V_+

battery
بطارية

positive
dc supply
مصدر تغذية
مستمر موجب

ac source
مصدر إشارة
متناوبة

ground
أرضي

wire
crossings
تقاطعات الأسلاك

resistor
مقاومة

unpolarized
capacitor
مكثف غير مستقطب

inductor
ملف

transformer
محول

مفتاح وحيد القطب
وحيد الوضع

مفتاح وحيد القطب
ثنائي الوضع

fuse
فاصمة منصهرة

diode
ديود

crystal
بللورة كريستال

زر ضغط مفتوح
في الحالة الطبيعية

operational
amplifier
مضخم عملياتي

zener diode
ديود زينر

meter
مقياس

زر ضغط مغلق
في الحالة الطبيعية

DPDT switch

relay
حاكمة

npn, pnp, b, c, e

bipolar transistors
ترانزستورات ثنائية القطبية

n-chan., p-chan., g, d, s

JFET transistors
ترانزستورات حقلية

n-chan., p-chan., g, d, s

depletion-type
MOSFET transistors
ترانزستورات MOSFET
من النوع المقلل

n-chan., p-chan., g, d, s

enhancement-type
MOSFET transistors
ترانزستورات MOSFET
من النوع المعزز

E, B_2, B_1

UJT transistor
ترانزستور وحيد المتصل

A, G, C

SCR thyristor
ثايرستور
(مقوم سيلكوني متحكم به)

MT1, G, MT2

TRIAC thyristor
ترياك

LED
ديود مصدر للضوء

lamp
مصباح

buzzer
رنان

microphone
ميكرفون

speaker
مصوات

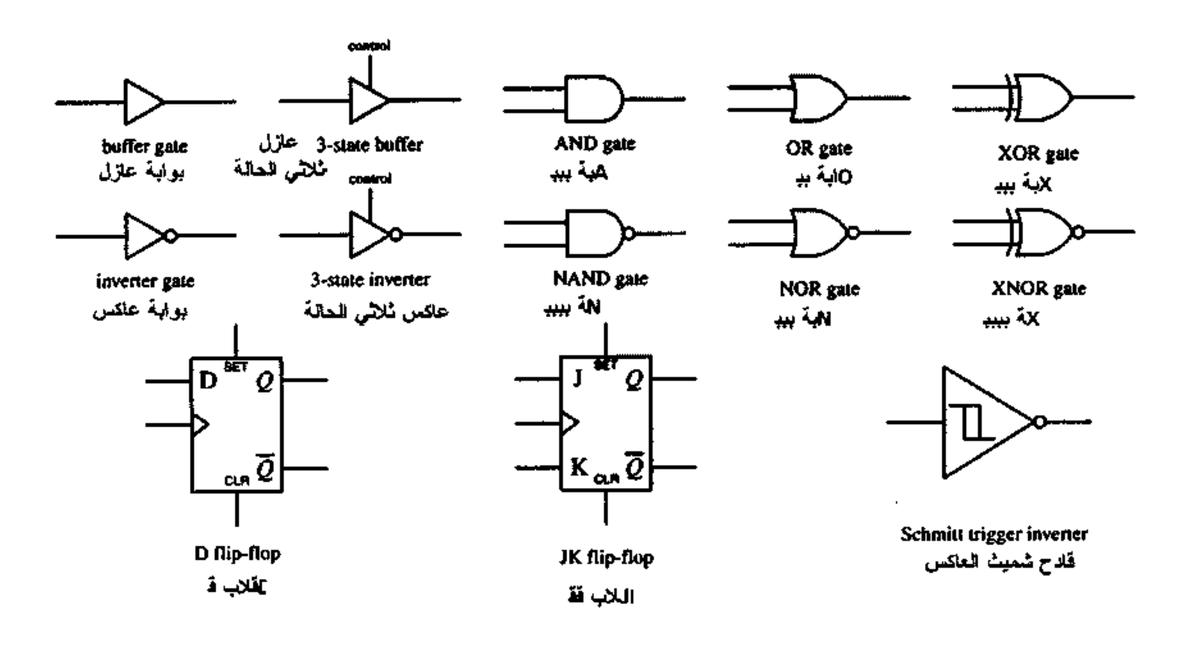
motor
محرك

antenna
هوائي

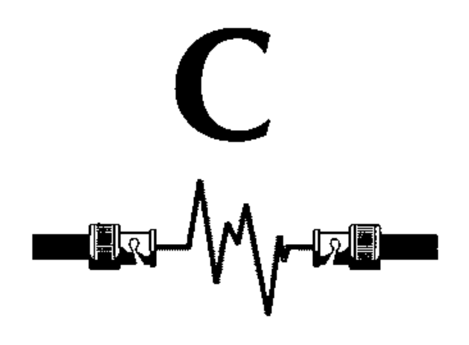
phototransistor
ترانزستور ضوئي

photocell
خلية ضوئية

photoresistor
مقاومة ضوئية



control
buffer gate
بوابة عازل
3-state buffer
عازل ثلاثي الحالة
AND gate
OR gate
XOR gate
control
inverter gate
بوابة عاكس
3-state inverter
عاكس ثلاثي الحالة
NAND gate
NOR gate
XNOR gate
SET
D
Q
CLR
$\overline{Q}$
D flip-flop
J
SET
Q
K
CLR
$\overline{Q}$
JK flip-flop
Schmitt trigger inverter
قادح شميث العاكس



حقائق وعلاقات مفيدة

1.C: الأبجدية الإغريقية

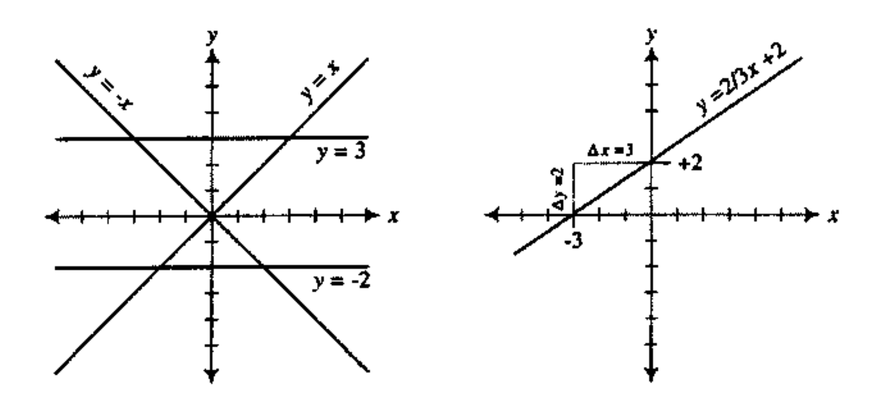
Alpha	A	∝	Eta	H	η
Beta	B	β	Theta	Θ	θ
Gamma	Γ	γ	Iota	I	z
Delta	Δ	δ	Kappa	K	κ
Epsilon	E	ε	Lambda	Λ	λ
Zeta	Z	ζ	Mu	M	μ
Nu	N	ν	Tau	T	τ
Xi	Ξ	ξ	Upsilon	Y	υ
Omicron	O	o	Phi	Φ	∅
Pi	Π	π	Chi	X	χ
Rho	P	ρ	Psi	Ψ	Ψ
Sigma	Σ	σ	Omega	Ω	ω

2.C: قوى الـ (10)، التسميات التي تسبق الواحدات

البادئة	الرمز	عامل الضرب
tera	T	$\times 10^{12}$
giga	G	$\times 10^{9}$
mega	M	$\times 10^{6}$
kilo	K	$\times 10^{3}$
centi	c	$\times 10^{-2}$
milli	m	$\times 10^{-3}$
micro	μ	$\times 10^{-6}$
nano	n	$\times 10^{-9}$
pico	p	$\times 10^{-12}$

3.C: التوابع الخطية $(y = mx+b)$

تمثل المعادلة $(y = mx+b)$ معادلة خط مستقيم، ميله $(\Delta y/\Delta x)$ يساوي m، ونقطة تقاطعه مع المحور (y) تساوي (b). تسمى (b) أيضاً باسم الإزاحة العمودية (Vertical Shift).

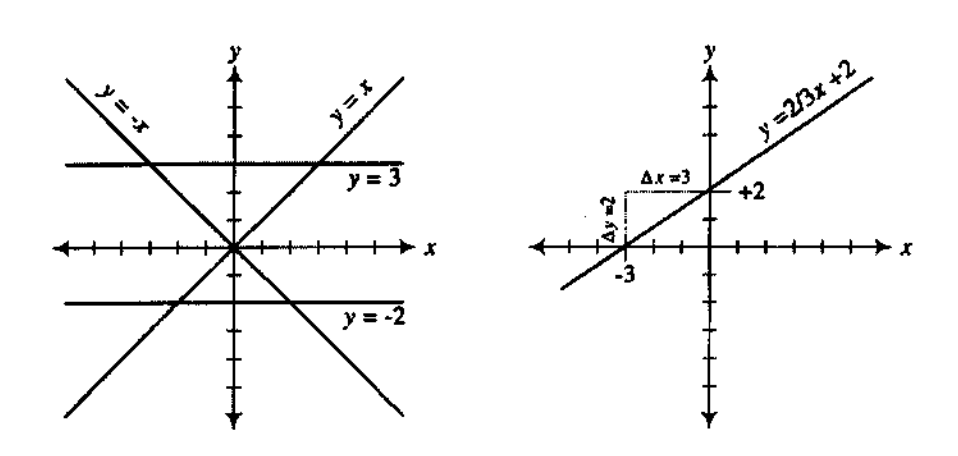


الشكل (1.C): خطوط (مستقيمات) مختلفة مرسومة في جملة إحداثيات ديكارتية.

4.C: المعادلة التربيعية $(y = ax^2+bx+c)$

تمثل المعادلة $(y = ax^2+bx+c)$ قطعاً مكافئاً في المستوي (xy). ويتأثر مقدار ضيق القطع المكافئ (narrowness) بالثابت (a). ويُعطى مقدار الإزاحة الأفقية لهذا القطع بالقيمة $(-b/2a)$، أما مقدار الإزاحة العمودية فتحدد قيمته بـ $(-b^2/a+c)$. تتحدد جذور المعادلة (نقاط تقاطع القطع مع المحور x) من العلاقة التالية:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$



الشكل (2.C): قطوع مكافئة مختلفة الثوابت.

5.C: الأس واللوغاريتم

الأس	اللوغاريتم	
$x^0 = 1$	إذا كان أساس اللوغاريتم 10 فإن:	
$1/x^n = x^{-n}$		$x = 10^n \Rightarrow Log_{10}x = n$
$x^{1/n} = \sqrt[n]{x}$		$Log_{10}(100) = 2 \Leftrightarrow 10^2 = 100$
$x^m.x^n = x^{m+n}$	إذا كان أساس اللوغاريتم e فإن:	
$(xy)^n = x^n.y^n$		$Ln(e) = 1 \Leftrightarrow e^1 = e = 2.718$
$(x^n)^m = x^{n.m}$		

أهم خواص اللوغاريتمات بالنسبة للأساس (b):

$$Log_b(1) = 0$$

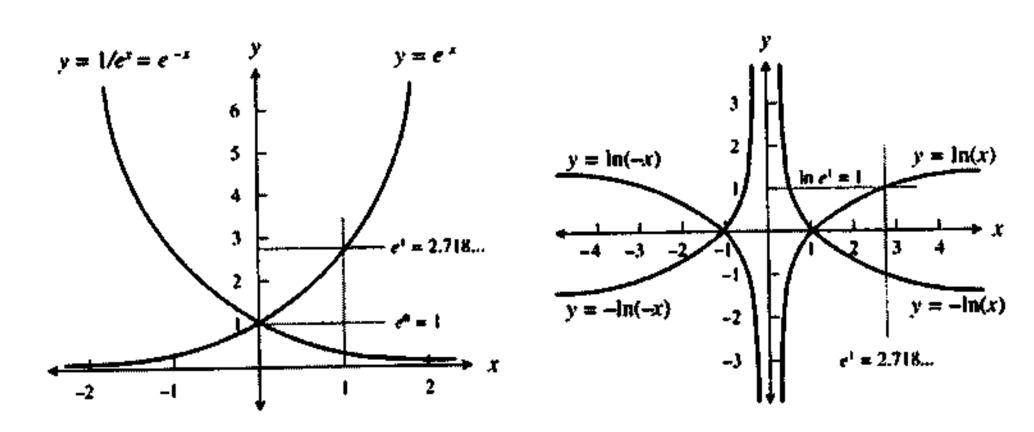
$$Log_b(b) = 1$$

$$Log_b(0) = \begin{cases} +\infty : b < 1 \\ -\infty : b > 1 \end{cases}$$

$$Log_b(x.y) = Log_b(x) + Log_b(y)$$

$$Log_b(x/y) = Log_b(x) - Log_b(y)$$

$$Log_b(x^y) = yLog_b(x)$$



الشكل (3.C): بعض التوابع الأسية واللوغارتمية.

6.C: علم المثلثات

إن الزاوية (θ) المقابلة للقوس (S) من دائرة نصف قطرها (R) تساوي النسبة ($\theta = S/R$) وتقدر θ في هذه العلاقة بالراديان والواحد راديان ($1 \text{ radian} = 180°/\pi$) ويساوي ($57.296\pi°$). إذا تم تدوير (θ) بعكس عقارب الساعة اعتباراً من الجهة الموجبة للمحور (x) تكون (θ) موجبة، أما إذا دارت (θ) بعكس عقارب الساعة فإننا نعتبرها سالبة. تُعرف النسب المثلثية للزاوية (θ) بأنها النسب بين أضلاع المثلث المبين في الشكل (4-C) وفق العلاقات التالية:

$$\sin\theta = \frac{Y}{R}; R = 1 \Rightarrow Y = \sin\theta$$

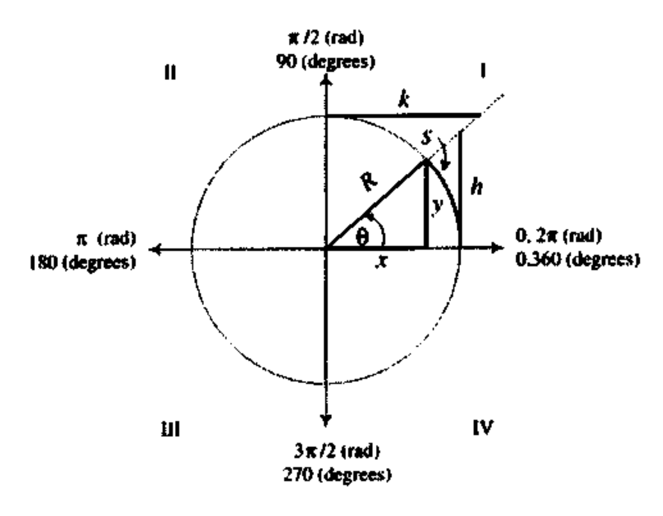
$$\cos\theta = \frac{X}{R}; R = 1 \Rightarrow X = \cos\theta$$

$$\tan\theta = \frac{y}{x}; R = 1 \Rightarrow h = \tan\theta$$

$$\cot\theta = \frac{x}{y} = \frac{1}{\tan\theta}; R = 1 \Rightarrow K = \cot\theta$$

$$\sec(\theta) = \frac{R}{x} = 1/\cos(\theta); R = 1 \Rightarrow \frac{1}{x} = \sec(\theta)$$

$$\csc(\theta) = \frac{R}{y} = \frac{1}{\sin(\theta)}; R = 1 \Rightarrow \frac{1}{y} = \cos(\theta)$$



الشكل (4.C): الدائرة المثلثية وتعريف النسب المثلثية للزاوية (θ).

توابع الجيب والتجيب

يبين الشكل (5-C) في الأعلى منحني التابع الجيبي Asin (θ) = y. يمكن تغيير مطال، ودور وإزاحة صفحة التابع الجيبي بتغيير العلاقة السابقة لتصبح كما يلي:

$$y = A \sin(BX + C) + D$$

A: مطال (amplitude).

$\frac{2\pi}{B}$: الدور (Periode) ويرمز للدور بالرمز (T).

C: الإزاحة الصفحية (Phase Shift).

D: الانحراف العمودي (Vertical Shift).

يمكن في مجال الإلكترونيات التعبير عن الجهد بالعلاقة التالية:

$$V(t) = V_0 \sin(\omega t + \Phi) + V_{dc}$$

V_0: جهد القمة Peak Voltage.

V_{dc}: الإزاحة المستمر (dc offset).

Φ: إزاحة الصفحة.

ω: التردد الزاوي مقدراً بالراديان/الثانية (rad/s).

والعلاقة بين التردد الزاوي (ω) والتردد (f) هي:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

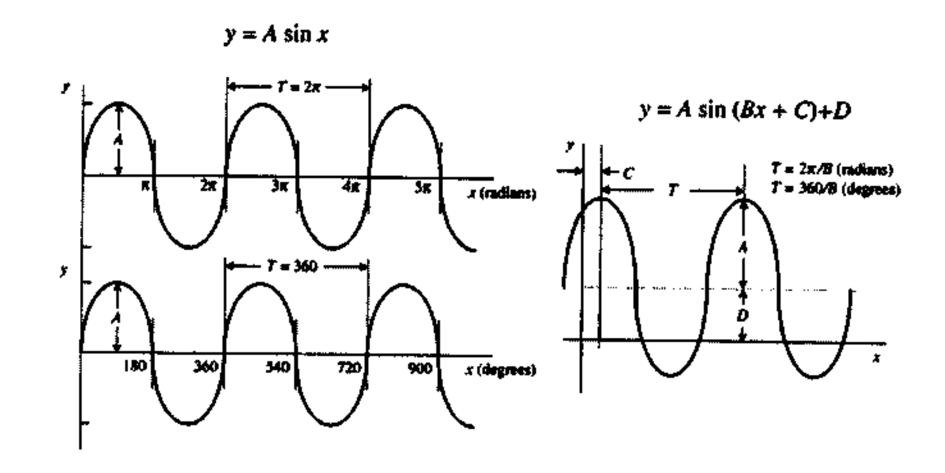
إن منحنى العلاقة (y = AcosX) مزاح بصفحة تساوي (π/2) أو (90°) بالنسبة للتابع (y = ASinX) وفيما يلي تُعطى بعض العلاقات بين تابع الجيب وتابع التجيب:

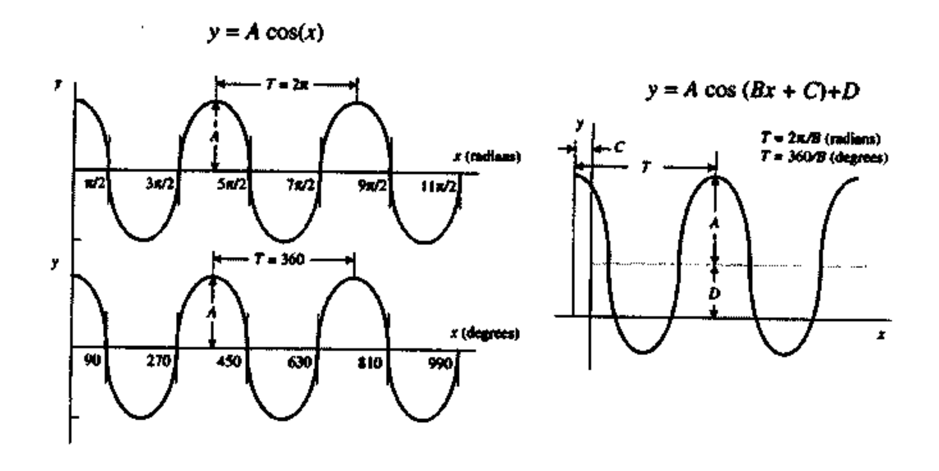
$\sin(\frac{\pi}{2} \pm x) = +\cos x$ أو $\sin(90° \pm x) = +\cos x$

$\sin(\frac{3\pi}{2} \pm x) = -\cos x$ أو $\sin(270° \pm x) = -\cos x$

$\cos(\frac{\pi}{2} \pm x) = \pm\cos x$ أو $\cos(90° \pm x) = \pm\sin x$

$\cos(\frac{3\pi}{2} \pm x) = \pm\sin x$ أو $\cos(270° \pm x) = \pm\sin x$





الشكل (5.C): توابع جيب (Sin) وتجيب (Cos).

7.C: الأعداد العقدية

تمت تغطية الأعداد العقدية بالتفصيل في الفصل الثاني.

8.C: حساب التفاضل

إذا كان لديك تابع $f(x)$، فإن هذا التابع يمكن أن يمثل مستقيماً (line) أو قطعاً مكافئاً (Parabola) أو منحنياً أسياً (exponential curve). تؤخذ نقطة ويتم تحريكها على المنحني $f(x)$، فإذا تخيلت مماساً يمس المنحني في تلك النقطة، عند تحريك النقطة يتغير ميل المماس وإذا تغير ميل المماس بتحرك النقطة فإن ذلك دليل على أن المنحني ليس مستقيماً. إن ميل المماس له أهمية كبيرة في الكثير من الحالات العملية، فإذا رسمت مثلاً منحنياً يبين موقع جسم كتابع للزمن، فإن ميل المنحني عند وقت محدد يمثل سرعة الجسم، وبالمثل إذا كان لديك منحنٍ يمثل علاقة الشحنة الكهربائية بالزمن فإن ميل هذا المنحني عند لحظة ما (t) يمثل التيار اللحظي. يمكن حساب ميل منحنٍ عند أي نقطة منه باستخدام حساب التفاضل. إذا كان لديك التابع $(y = x^2)$ فبالإمكان إيجاد تابع آخر يُسمى مشتق (y)، ويعبر عن المشتق كما يلي:

$$y' = \frac{dy}{dx} = 2x$$

فإذا أردت معرفة الميل عند $x = 2$ ما عليك إلا تعويض $(x = 2)$ في معادلة (y') فتحصل على ميل يساوي (4)، ولكن قد تتساءل الآن كيف عرفنا أن مشتق التابع $(y = x^2)$ هو $(y' = 2x)$، وسنوضح ذلك فيما يلي:

لإيجاد مشتق تابع $y = f(x)$ نفرض أن لدينا نقطة $P(x,y)$ من التابع ونقطة أخرى $Q(x+\Delta x, y+\Delta y)$. إن ميل الخط بين (P) و Q هو:

$$\frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

نعوض ذلك في التابع السابق $f(x) = x^2$ فنحصل على:

$$f(x+\Delta x) = (x+\Delta x)^2$$

وبالتالي يكون ميل المستقيم بين P و Q لهذا التابع مساوياً:

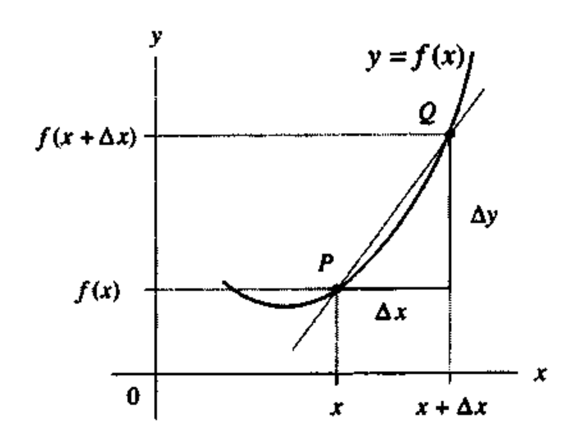
$$\frac{(x+\Delta x)^2 - x^2}{\Delta x}$$

نعتبر أن (x) ثابت وأن (Δx) ينتهي إلى الصفر فإذا انتهى الميل إلى قيمة تتعلق فقط بـ (x) فإننا ندعو هذه النهاية ميل المنحني عند النقطة (P). إن ميل المنحني عند النقطة (P) هو تابع لـ (x) وهو معرف عند كل قيمة لـ (x) توجد عندها النهاية. يرمز للمشتق $f'(x)$ أو $(\frac{dy}{dx})$ أو (df/dx) ونعبر عن المشتق بالعلاقة التالية:

$$f'(x) = \frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

وبالنسبة للتابع $y = x^2$ إذا عوضت في العلاقة الأخيرة وأوجدت النهاية فإنك سوف تحصل على $f'/(x) = dy/dx = 2x$.

الآن وفي الواقع العملي لا داعي دوماً لإتباع الطريقة السابقة في إيجاد مشتق تابع، لأن ذلك يحتاج إلى وقت طويل ويتطلب معرفة جيدة بإيجاد النهايات ويصبح الأمر معقداً عند إيجاد مشتق تابع مثل $2e^x.\sin(3x+2)$، وبدلاً من كل ذلك عليك اتباع بعض القواعد العامة في إيجاد المشتقات، ويبين الجدول التالي بعضاً من هذه القواعد وبعض الاشتقاقات البسيطة التي تواجهك كثيراً في الحياة العملية.



الشكل (6-C): شكل يوضح مبدأ حساب التفاضل.

في الجدول تعبر الرموز (a) و(n) عن ثوابت، أما (u) أو v فهي توابع.

المشتق	مثال
$\frac{d}{dx}a = 0$	$\frac{d}{dx}4 = 0$
$\frac{d}{dx}x^n = nx^{n-1}; \frac{1}{xm} = x^{-n}$	$\frac{d}{dx}x = 1; \frac{d}{dx}x^2 = 2x; \frac{d}{dx}x^5 = 5x^4$ $\frac{d}{dx}x^{-1/2} = -\frac{1}{2}x^{-3/2}$
$\frac{d}{dx}e^x = e^x$	
$\frac{d}{dx}\ln x = 1/x$	
$\frac{d}{dx}\sin x = \cos x$	
$\frac{d}{dx}\cos x = -\sin x$	
$\frac{d}{dx}au(x) = a\frac{d}{dx}u(x)$	$\frac{d}{dx}3x^2 = 3\frac{d}{dx}x^2 = 6x; \frac{d}{dx}3e^x = 3\frac{d}{dx}e^x = 3e^x$
	$\frac{d}{dx}7\sin x = 7\frac{d}{dx}\sin x = 7\cos x$
$\frac{d}{dx}(u + v) = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dx}$	$\frac{d}{dx}(2x + x^2) = \frac{d}{dx}(2x) + \frac{d}{dx}(x^2) = 2 + 2x$
$\frac{d}{dx}(\frac{u}{v}) = \frac{v\frac{du}{dx} - u\frac{dv}{dx}}{v^2}$	$\frac{d}{dx}(\frac{x^2 + 1}{x^2 - 1}) = \frac{2 \times (x^2 - 1) - 2 \times (x^2 + 1)}{(x^2 - 1)^2} = \frac{-4x}{(x^2 - 1)2}$
قاعدة: إذا كان (u) تابعاً لـ (y) وكان (y) تابعاً لـ (x) فإن:	$\frac{d}{dx}\sin(ax) = a\cos(ax);$
$\frac{d}{dx}\{u[v(x)]\} = \frac{du}{dx}.\frac{dv}{dx}$	$\frac{d}{dx}e^{2x} = 2e^{2x}$



D



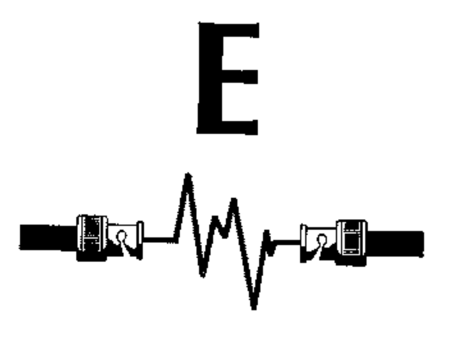
إيجاد العناصر

إن الطريقة المتبعة لإيجاد أنواع عديدة جداً من العناصر الإلكترونية، هي طريقة البحث في كتالوكات الطلب البريدي (mail-order catalogs). يوجد العديد من بائعي العناصر الإلكترونية، ويمكن اختيار أحدهم لتشتري منه ما تحتاج من عناصر، ويبين الجدول التالي عناوين مواقع الإنترنت وأرقام الهواتف لأهم المتعاملين ببيع العناصر والأدوات الإلكترونية، وأغلب هذه الشركات تملك كتالوكاً متاحاً على الشبكة ويمكنك استعراض هذا الكتالوك والبحث فيه عن الشيء الذي تريده، ويمكن طلب نسخة مطبوعة من هذا الكتالوك مجاناً (في أغلب الأحيان) بإرسال بريد إلكتروني للشركة أو بالاتصال الهاتفي معها. تختلف الأسعار من شركة إلى أخرى، ولذلك عليك مقارنة الأسعار قبل أن تقوم بالطلب.

الشركة	موقع الإنترنت	رقم الهاتف
All Electronics	http://www.allelectronics.com	(888) 826-5432
B.G Micro	http://www.bgmicro.com	(800) 276-2206
Circuit Specialists, Inc	http://www.cir.com	(800) 528-1417
Debco Electronics	http://www.debco.com	(800) 423-4499
Digi Key	http://www.digi-key.com	(800) 344-4539
Electronics Express	http://www.elexp.com	(800) 972-2225
Electronics Expediter, Inc	http://www.expediters.com	(800) 987-7171
Gateway Electronics, Inc	http://www.gatewayelex.com	(800) 669-5810
Hosfelt	http://www.hosfelt.com	(800) 524-6464
Jameco	http://www.jameco.com	(800) 831-4242
Marlin P.Jones & Assoc, Inc.	http://www.mpia.com	(800) 652-6733
Mouser Electronics	http://www.mauser.com	(800) 346-6873
Nework Shack	http://www.newark.com	(800) 463-9275
Radio Shack	http://www.radioshack.com	(800) 843-7422
Surplus Sales of Nebraska	http://www.surpluaasles.com	(800) 244-4567

مواد متنوعة

تحتاج في بعض الحالات إلى بعض أنواع العناصر، والأدوات، والمكونات التي لها طبيعة غير إلكترونية، فإذا كنت تبحث عن شيء يناسبك ولا تعرف بالضبط أين تجده أو ماذا تسميه، فإن أفضل شيء تفعله للبحث عن حاجتك هو تصفح سجل توماس (Thomas Register) أو تصفح كتالوك Grainger Catalog، وسجل توماس هو إحدى المطبوعات (سلسلة من الكتب الخضراء الكبيرة) التي تذكر أسماء عدد كبير من الشركات الصانعة وشركات الخدمات الأمريكية وستجد في هذه المطبوعة شركات متخصصة بأشياء كالقولبة الحقنية (injection molding)، المكونات المعدنية (metal hardware)، السبائك المعدنية، عُدد إصلاح الآلات، والعناصر الإلكترونية، تصميم وتصنيع الحواسيب، معدات الاختبار، المحركات، هندسة التصنيع الخاص، الليزر، التعليب، تسويق المنتجات، المواد الكيماوية، الحواسيب، الأشياء المطاطية، وغيرها. كما تجد في السجل (register) عناوين الشركات، وأرقام الهواتف، وعناوين مواقع الإنترنت، كما يزودك السجل بصور لمنتجات الشركات وتعطيك هذه الصور فكرة عن كيفية تصميم اختراعك. يوجد سجل Thomas في أغلب المكتبات المحلية (في الولايات المتحدة الأميركية)، أو يمكن الدخول إليه عبر الإنترنت على عنوان الموقع (http://www.thomasregister.com) أما كتالوك Grainger فإنه موجه للدعاية لمنتجات الشركات بهدف ترويج المنتجات وبيعها، وتجد فيه الكثير من المواد والمعدات والأشياء المفيدة مثل المحركات، وأدوات اللحام، وأدوات التوافق الكهربائي أو أجهزة التغذية بالجهود المستمرة الصغيرة، العدد (Tools)، مضخات هيدروليكية، علب توزيع قدرة كهربائية للمنازل، بطاريات، المواد اللاصقة، الرولمانات (ball bearings)، المعادن، المواد البلاستيكية، أجهزة ومعدات الاختبار الكهربائي، أسلاك لف المحركات بمختلف القياسات بالإضافة إلى مواصفات كافة المواد المعروضة. يمكنك طلب كتالوك Grainger مجاناً إذا كنت تمثل إحدى الشركات أو المؤسسات، أو يمكنك تصفح الكتالوك في إحدى المكتبات أو تصفحه عبر الإنترنت على العنوان (http://www.grainger.com).



القولبة الحقنية وبراءات الاختراع

القولبة الحقنية

القولبة الحقنية هي عملية إنتاج يتم فيها صهر حبيبات البلاستيك تحت ضغط عال وقولبتها بواسطة قوالب ألمنيوم أو فولاذ. تستخدم هذه الطريقة لتكوين عدد كبير من الأدوات مثل أغلفة شاشات الحواسيب، ولوحات مفاتيح الحواسيب، وأغلفة الهواتف النقالة وأجهزة الراديو، والملاعق البلاستيكية، والألعاب، وأية أداة بلاستيكية، فإذا كنت ترغب في صنع حامل خاص (Special holder) لدارتك، أو إذا كنت مهتماً في صنع أي ابتكار من البلاستيك، فإن القولبة الحقنية هي التي تؤمن لك ذلك. وقبل أن تدخل مرحلة القولبة الحقنية عليك صنع نموذج لابتكارك إما من الخشب أو من الطين ثم عليك عرض هذا النموذج على أحد العاملين في مجال القولبة الحقنية كي يأخذ فكرة عن النموذج ويقيم التصميم ويعطيك فكرة عن كلفة وتسعيرة القولبة الحقنية، ولكي تقوم شركات القولبة الحقنية بتصنيع ابتكارك، عليك أن تؤمن لها نموذجاً حاسوبياً (Computer model) للابتكار ويتم وضع هذا النموذج من قبل مهندس تصميم قولبة حقنية، ويستخدم المهندس في عمله برنامجاً يسمى (Solid Works) أو برنامجاً مكافئاً له لوضع النموذج الحاسوبي. يُعطى النموذج الحاسوبي للابتكار إلى حاسوب خاص موصول مع آلة تحضر القالب المطلوب من الألمنيوم أو الفولاذ. الألمنيوم أرخص من الفولاذ، إلا أنه لا يدوم طويلاً خلال عملية الإنتاج اللاحقة. إن عملية القولبة الحقنية ليست رخيصة، وربما يكلف قولبة شيء بحجم جهاز هاتف مثلاً 3000$ أو حتى 10000$ وتختلف الكلفة حسب القالب المستخدم لعملية الحقن فقوالب الفولاذ أغلى من قوالب الألمنيوم، وتزداد الكلفة إذا كان السطح يحتاج إلى حفر خاص (Special etching).

براءات الاختراع

براءة الاختراع هي وثيقة تصدرها الحكومة الأمريكية وتمنح بموجبها حقوقاً خاصة لأشخاص أو مؤسسات، وتسمح براءة الاختراع لصاحبها بمنع الآخرين من تصنيع أو بيع اختراعه أو الحقوق المطلوب حمايتها في براءة الاختراع. ويتحدد زمن مفعول براءة الاختراع بعشرين سنة من تاريخ الحصول عليها، وإذا حاولت شركة أو أية جهة أخرى تطوير براءة الاختراع أو استخدامها فمن حق صاحبها رفع دعوى قضائية بخرق حقوق براءة الاختراع أمام محكمة فيدرالية، فإذا كان لديك اختراع فريد من نوعه ويمكن الاستفادة منه تجارياً، عليك الحصول على براءة اختراع لأنك إذا حاولت طرح منتجك غير المحمي ببراءة اختراع في السوق فإن المتطفلين من الأفراد وحتى المؤسسات يسرقون فكرتك ويخرجونك من السوق بدون أي ثمن، وبدون براءة اختراع تكون حقوقك باختراعك محدودة جداً. وللحصول على المزيد من المعلومات عن مكتب براءات الاختراع والعلامات التجارية في الولايات المتحدة ننصحك بالدخول إلى موقع United States Patent and Trademark Office والذي يرمز له اختصاراً بـ (USPTO) على العنوان: www.uspto.gov.

ولتسجيل براءة اختراع لابد من القيام أولاً بعدة أشياء، حيث يجب أولاً التأكد أن الاختراع فريد من نوعه، ويجب أن يكون لديك ضمان أكيد بأن أحداً ما لم يقم قبلك بحماية الفكرة أو المنتج الذي تريد تسجيل براءة اختراع فيه، ويمكن تكليف محام أو باحث متخصص بأمور براءات الاختراع بالتحقق من ذلك، ويكلف ذلك أجراً عالياً. ولكن إذا كان لديك الوقت الكافي يمكنك التأكد من ذلك بنفسك حيث توجد في كل ولاية من الولايات المتحدة مكتبة واحدة على الأقل مخصصة لحفظ براءات الاختراع والعلامات التجارية، وفي هذه المكتبات يمكنك الجلوس على الحاسوب وكتابة كلمات مفتاحية حول براءة الاختراع فتحصل على أرقام مرجعية، وبواسطة هذه الأرقام تحصل على أكداس من الكتب التي عليك البحث فيها عن ما هو مسجل من براءات الاختراع. يمكن البحث أيضاً عبر الإنترنت، وأوسع محركات البحث انتشاراً بهذا الخصوص هو محرك IBM وعنوان موقعه: www.patents.ibm.com ويسمح لك هذا المحرك بإجراء بحث مجاني عن كل براءات الاختراع الممنوحة منذ عام 1971، وعليك فقط كتابة بعض الكلمات المفتاحية فتظهر لك قائمة بالاختراعات المسجلة والحاصلة على براءة اختراع، ومن خلال المقارنة والموازنة بين البراءات المتماثلة يمكنك تعزيز معلوماتك عن مدى وجود صفة فريدة لاختراعك أنت.

إذا وجدت أن اختراعك فريد، فإن الخطوة التالية التي يجب القيام بها، قبل أن تبدأ بإعداد استمارات براءة الاختراع، هي أن تتأكد فيما إذا كان اختراعك حيوياً ومفيداً تجارياً. وكذلك يجب أن تقرر فيما إذا كنت ستقوم بمفردك بأعمال التسويق والتصنيع، والتوزيع أو فيما إذا كنت تريد بيع هذا الاختراع إلى جهة صانعة، لأن الأمور تصبح محيرة هنا، لأنك إذا قررت بيع اختراعك لجهة صانعة تبدي رغبة بالحصول عليه، فإنه يتوجب عليك عرض الاختراع لهؤلاء الناس، فبدون معلومات من الجهات الصناعية لا يمكنك الاستمرار في الأمور إلى الأمام وبنفس الوقت هناك مخاطرة، لأنك تعرض فكرة غير محمية فالأمر محير، هل تدفع 1000$ تقريباً كلفة إضبارة وشهادة براءة اختراع ومحام وتعرض الأمر على الصناعيين بعد ذلك، أم تتأكد فعلاً ومراراً من أن اختراعك فريد ومفيد صناعياً وتسجله وتدفع رسومه ثم تعرضه. ويوجد حل للتخلص من هذه المشكلة وهو براءة الاختراع المؤقتة (Provisional Patent) وتكلف حوالي 75$ (في عام 1999) وتدوم فترة صلاحيتها عاماً واحداً، وبعد ذلك عليك الحصول على براءة اختراع نظامية ولا يصبح هذا الشيء سارياً إلا بعد الحصول على الموافقة النهائية على براءة الاختراع، فإذا حصل نزاع في محكمة حول الموضوع، يمكنك بواسطة براءة الاختراع المؤقتة الإثبات بأنك وصلت للفكرة قبل غيرك والشيء الجيد ببراءة الاختراع المؤقتة هو عدم الحاجة لذكر كل التفصيلات عن الاختراع، فلا حاجة أبداً لتقديم تفصيلات عن اختبار المنتج وتطويره. وبعد عرض اختراعك على الصناعيين يمكنك أن تقرر بحرية إذا كنت ترغب في استثماره بنفسك أو بيعه. وباختصار عليك الموازنة بين بيع براءة الاختراع إذا كان المنتج المزمع تصنيعه حيوياً ومفيداً أو دفع مبلغ لا بأس به لتسجيلها لنفسك واستثمارها. يتوفر في المكتبات كتاب رائع حول براءات الاختراع بعنوان (Patent it yourself) للمؤلف David Pressman، والناشر Nolo Press، يناقش هذا الكتاب أنواعاً مختلفة من براءات الاختراع المتاحة (فوائد، تصميم، إنتاج) ويقدم مصادر ومراجع هامة جداً (كعناوين إنترنت، وعناوين بريد وأرقام هواتف) ويتكلم عن كيفية البحث عن براءات الاختراع وكيفية كتابة طلب براءة الاختراع ومناقشة القضايا القانونية لبراءة الاختراع والكلفة المتعلقة بها وتسويقها إضافة إلى أمور أخرى فإذا كنت مخترعاً ومهتماً بتسويق اختراعك (أو اختراعاتك) عليك اقتناء هذا الكتاب.



الخط الزمني لتاريخ الالكترونيات

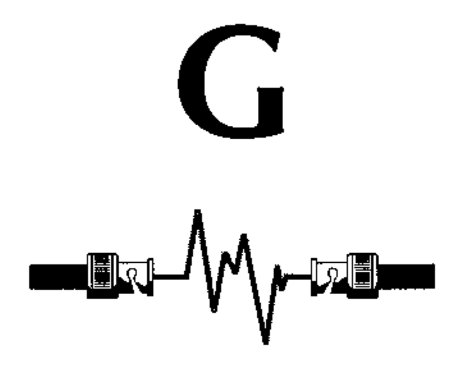
DATE	INVENTION/DISCOVERY	DISCOVERER(S)
1745	Capacitor	Leyden
1780	Galvanic action	Galvani
1800	Dry cell	Volta
1808	Atomic theory	Dalton
1812	Cable insulation	Sommering and Schilling
1820	Electromagnetism	Oersted
1821	Thermoelectricity	Seebeck
1826	Ohm's law	Ohm
1831	Electromagnetic induction	Faraday
1831	Transformer	Faraday
1832	Self-induction	Henry
1834	Electrolysis	Faraday
1837	Relays	Cooke, Wheatstone, and Davy
1839	Photovoltaic effect	Becquerel
1843	Wheatstone bridge	Wheatstone
1845	Kirchhoff's laws	Kirchhoff
1850	Thermistor	Faraday
1860	Microphone diaphragm	Reis
1865	Radiowave propagation	Maxwell
1866	Transatlantic telegraph cable	T.C. & M. Co.

DATE	INVENTION/DISCOVERY	DISCOVERER(S)
1874	Capacitors, mica	Bauer
1876	Rolled-paper capacitor	Fitzgerald
1876	Telephone	Bell
1877	Phonograph	Edison
1877	Microphone, carbon	Edison
1877	Loudspeaker moving coil	Siemens
1878	Cathode rays	Crookes
1878	Carbon-filament incandescent lamp	Swan, Stearn, Topham, and Cross
1879	Hall effect	Hall
1880	Piezoelectricity	Curie
1887	Gramophone	Berliner
1887	Aerials, radiowave	Hertz
1888	Induction motor	Tesla
1893	Waveguides	Thomson
1895	X-rays	Roentgen
1896	Wireless telegraphy	Marconi
1900	Quantum theory	Planck
1901	Fluorescent lamp	Cooper and Hewitt
1904	Two-electrode tube	Fleming
1905	Theory of relativity	Einstein
1906	Radio broadcasting	Fessenden
1908	Television	Campell, Swinton
1911	Superconductivity	Onnes
1915	Sonar	Langevin
1918	Multivibrator circuit	Abraham & Bloch
1918	Atomic transmutation	Rutherford
1919	Flip-flop circuits	Eccles and Jordan
1921	Crystal control of frequency	Cady
1924	Radar	Appleton, Briet, Watson, and Watt
1927	Negative-feedback amplifier	Black
1932	Neutron	Chadwick
1932	Particle accelerator	Crockcroft and Walton

DATE	INVENTION/DISCOVERY	DISCOVERER(S)
1934	Liquid crystals	Dreyer
1935	Transistor field effect	Hieil
1935	Scanning electron microscope	Knoll
1937	Xerography	Carlson
1937	Oscillograph	Van Ardenne, Dowling, and Bullen
1938	Nuclear fission	Fristsch and Meitner
1939	Early digital computer	Aicken and IBM
1943	First general-purpose computer (ENIAC: 10 ft tall, 11,000 sq ft, 30 tons, 70,000 resistors, 10,000 capacitors, 6000 switches, 18,000 vacuum tubes, 150 kW power, programmed with knobs and switches)	Mauchly and Eckert
1943	Printed wiring	Eisler
1945	First commercial computer (UNIVAC I)	—
1948	Transistor (bipolar)	Bardeen, Bratlain, and Shockley
1948	Holography	Gabor and Shockley
1950	Modem	MIT & Bell Labs
1950	Karnaugh mapping technique (digital logic)	Karnaugh
1952	Digital voltmeter	Kay
1953	Unijunction transistor	GEC
1954	Transistor radioset	Regency
1954	Solar battery	Chapin, Fuller, and Pearson
1956	Transatlantic telephone cable	U.K. & U.S.A.
1957	Sputnik I satellite	U.S.S.R.
1957	FORTRAN programming language	Watson Scientific
1958	Video tape recorder	U.S.A.
1958	Laser	Schalow and Townes
1959	Planar manufacturing process for transistors	Fairchild Semicondutor
1959	First integrated circuits	Fairchild Semiconductor and Texas Instruments
1960	Light-emitting diodes	Allen and Gibbons
1961	Electronic clock	Vogel and Cie
1962	MOSFET transistors	Hofstein, Heiman, and RCA
1963	Electronic calculator	Bell Punch Co.

DATE	INVENTION/DISCOVERY	DISCOVERER(S)
1964	BASIC programming language	Kemeny and Kurtz
1966	Optical fiber communications	Kao and Hockham
1969	UNIX operating system	AT&T's Bell Labs
1970	Floppy disk recorder	IBM
1970	First microprocessor (4004, 60,000 oper/s)	Intel
1971	EPROM	—
1971	PASCAL programming language	Wirth
1971	First microcomputer-on-a-chip	Texas Instruments
1972	8008 processor (200 kHz, 16 kB)	Intel
1972	Ping Pong (early video game)	Atari
1972	First programmable word processor	Automatic Electronic Systems
1972	5.25-in diskette	—
1973	Josephson junction	IBM
1973	Tunable continuous-wave laser	Bell Labs
1973	Ethernet	Metcalfe
1974	C programming language	Kernighan, Ritchie
1974	Programmable pocket calculator	Hewlett Packard
1975	BASIC for personal computers	Allen
1975	Liquid-crystal display	United Kingdom
1975	First personal computer (Altair 8800)	Roberts
1975	Integrated optical circuits	Reinhart and Logan
1975	Microsoft founded	Gates and Allen
1976	Apple I computer	Wozniak, Jobs
1977	Commodore PET (14 K ROM, 4 K RAM)	Commodore Business Machines
1978	Space Invaders video game	Taito
1978	WordPerfect 1.0	Satellite Software
1980	3.5-in floppy (2-sided, 875 kB)	Sony Electronics
1980	Commodore 64	Commodore Business Machines
1980	Macintosh computer	Apple Computer
1981	IBM PC (8088 processor)	IBM
1981	MS-DOS 1.0	Microsoft
1982	Laser printer	IBM

DATE	INVENTION/DISCOVERY	DISCOVERER(S)
1983	Satellite television	U.S. Satellite Communications, Inc.
1983	"Wet" solar cell	Germany/U.S.A.
1983	First built-in hard drive (IBM PC-XT)	IBM
1983	Microsoft Word	Microsoft
1983	C++ programming language	Stroostrup
1984	CD-ROM player for personal computers	Philips
1985	300,000 simultaneous telephone conversations over single optical fiber	AT&T, Bell Laboratory
1987	Warm superconductivity	Karl Alex Mueller
1987	80386 microprocessor (25 MHz)	Intel
1990	486 microprocessor (33 MHz)	Intel
1994	Pentium processor (60/90 MHz 166.2 mips)	Intel
1996	Alpha 21164 processor (550 MHz)	Digital Equipment
1996	P2SC processor (15 million transistors)	IBM
1997	Deep Blue (IBM RS/6000SP supercomputer) defeats world chess champ Garry Kasparov	IBM



معطيات العناصر، قائمة بالدارات المتكاملة المنطقيَّة، والترميز الأجنبي للعناصر الالكترونية نصف الناقلة

Standard Resistance Values for 5% Carbon-Film Resistors

1.0 Ω	8.2 Ω	33 Ω	120 Ω	470 Ω	1.8 kΩ	6.8 kΩ	27 kΩ	100 kΩ	390 kΩ	1.5 MΩ	6.2 MΩ
1.1 Ω	9.1 Ω	36 Ω	130 Ω	510 Ω	2.0 kΩ	7.5 kΩ	30 kΩ	110 kΩ	430 kΩ	1.6 MΩ	6.8 MΩ
1.2 Ω	10 Ω	39 Ω	150 Ω	560 Ω	2.2 kΩ	8.2 kΩ	33 kΩ	120 kΩ	470 kΩ	1.8 MΩ	7.5 MΩ
1.3 Ω	11 Ω	43 Ω	160 Ω	620 Ω	2.4 kΩ	9.1 kΩ	36 kΩ	130 kΩ	510 kΩ	2.0 MΩ	8.2 MΩ
1.5 Ω	12 Ω	47 Ω	180 Ω	680 Ω	2.7 kΩ	10 kΩ	39 kΩ	150 kΩ	560 kΩ	2.2 MΩ	9.1 MΩ
1.6 Ω	13 Ω	51 Ω	200 Ω	750 Ω	3.0 kΩ	11 kΩ	43 kΩ	160 kΩ	620 kΩ	2.4 MΩ	10 MΩ
1.8 Ω	15 Ω	56 Ω	220 Ω	820 Ω	3.3 kΩ	12 kΩ	47 kΩ	180 kΩ	680 kΩ	2.7 MΩ	

Selection of Diodes

DEVICE	TYPE	MATERIAL	PEAK INVERSE VOLTAGE (V)	AVERAGE FORWARD CURRENT (mA)	SURGE CURRENT (A)	FORWARD VOLTAGE DROP (V)
1N34	Signal	Ge	60	8.5	—	1.0
1N34A	Signal	Ge	80	—	—	1.0
1N60	Signal	Ge	80	0	—	1.0
1N67A	Signal	Ge	100	4.0	—	1.0
1N191	Signal	Ge	90	5.0	—	1.0
1N914	Fast switch	Si	75	75	0.05	1.0
1N4001	Rectifier	Si	50	1000	30	1.1
1N4002	Rectifier	Si	100	1000	30	1.1

Selection of Diodes ***(Continued)***

DEVICE	TYPE	MATERIAL	PEAK INVERSE VOLTAGE (V)	AVERAGE FORWARD CURRENT (mA)	SURGE CURRENT (A)	FORWARD VOLTAGE DROP (V)
1N4003	Rectifier	Si	200	1000	30	1.1
1N4004	Rectifier	Si	400	1000	30	1.1
1N4005	Rectifier	Si	600	1000	30	1.1
1N4006	Rectifier	Si	800	1000	30	1.1
1N4007	Rectifier	Si	1000	1000	30	1.1
1N4148	Signal	Si	75	10	—	1.0
1N4152	Fast switch	Si	40	20	—	1.0
1N5400	Rectifier	Si	50	1000	200	—
1N5401	Rectifier	Si	100	3000	200	—
1N5402	Rectifier	Si	200	3000	200	—
1N5404	Rectifier	Si	400	3000	200	—
1N5406	Rectifier	Si	600	3000	200	—
1N5408	Rectifier	Si	1000	3000	200	—
1N4448	Signal	Si	75	—	0.72	0.72
1N5817	Schottky	Si	20	1000	25	0.45
1N5818	Schottky	Si	30	1000	25	0.55
1N5819	Schottky	Si	40	1000	25	0.60
SB1100	Schottky	Si	100	1000	30	0.85
1N5820	Schottky	Si	20	3000	80	0.475
1N5821	Schottky	Si	30	3000	80	0.400
1N5822	Schottky	Si	40	3000	150	0.525
P600A	Rectifier	Si	50	6000	400	—
P600B	Rectifier	Si	100	6000	400	—
P600D	Rectifier	Si	200	6000	400	—
P600M	Rectifier	Si	1000	6000	400	—

Selection of Zener Diodes

	Power (W)							
Volts	0.25	0.4	0.5	1.0	1.5	5.0	10.0	50.0
1.8	IN4614							
2.0	IN4615							
2.2	IN4616							
2.4	IN4617	IN4370,A						
3.0	IN4619	IN4372,A	IN5987					
3.3	IN4620	IN5518	IN5988	IN3821	IN5913	IN5333,B		
3.6	IN4621	IN5519	IN5989	IN3822	IN5914	IN5334,B		
3.9	IN4622	IN5520	IN5844	IN3823	IN5915	IN5335,B	IN3993,A	IN4549,B
4.7	IN4624	IN5522	IN5846	IN3825	IN5917	IN5337,B	IN3995,A	IN4551,B
5.6	IN4626	IN5524	IN5848	IN3827	IN5919	IN5339,B	IN3997,A	IN4553,B
7.5	IN4100	IN5527	IN5997	IN3830	IN3786	IN5343,B	IN4000,A	IN4556
10.0	IN4104	IN5531	IN6000	IN4740	IN3789	IN5347,B	IN2974,B	IN2808,B
12.0		IN5532	IN6002	IN3022,B	IN3791	IN5349,B	IN2976,B	IN2810,B
14.0	IN4108	IN5534	IN5860			IN5351,B	IN2978,B	IN2812,B
16.0	IN4110	IN5536	IN5862	IN3025,B	IN3794	IN5353,B	IN2980,B	IN2814,B
20	IN4114	IN5540	IN5866	IN3027,B	IN3796	IN5357,B	IN2984,B	IN2818,B
24	IN4116	IN5542	IN6009	IN3929,B	IN3798	IN5359,B	IN2986,B	IN2820,B
28	IN4119	IN5544	IN5871			IN5362,B		
60	IN4128		IN5264,A,B			IN5371,B		
100	IN4135	IN985	16024	IN3044,A,B	IN3813	IN5378,B	IN3005,B	12838,B
120		IN987	IN6026	IN3046,B	IN5951	IN5380,B	IN3008A,B	IN2841,B

General-Purpose Bipolar Transistors

DEVICE	TYPE	V_{CEO} MAX (V)	V_{CBO} MAX (V)	V_{EBO} MAX (V)	I_C MAX (mA)	P_D (W)	H_{FE} I_C = 0.1 mA	H_{FE} I_C = 150 mA	F_T
2N918	NPN	15	30	3.0	50	0.2 (3 mA)	20	—	600
2N2102	NPN	65	120	7.0	1000	1.0	20	40	60
2N2219	NPN	30	60	5.0	800	3.0	35	100	250
2N2219A	NPN	40	—	—	150	—		100 (min)	300
2N2222	NPN	30	60	5.0	800	1.2	35	100	250
2N2222A	NPN	40	—	—	150	—		100 (min)	250
2N2484	NPN	60	—	—	50	—		100 (min)	60
2N2857	NPN	15	—	—	40	—		30 (min)	1200
2N2905	PNP	40	60	5.0	600	0.6	35	—	200
2N2907	PNP	40	60	5.0	600	0.4	35	—	200
2N3019	NPN	80	—	—	1000	—		100 (min)	100
2N3053	NPN	40	60	5.0	700	5.0	0	50	100
2N2904	NPN	40	60	6.0	200	0.625	40	—	300
2N2907A	PNP	40	—	—	600	—		75 (min)	200
2N3439	NPN	350	—	—	1000	—		40 (min)	15
2N3467	PNP	40	—	—	1000	—		40 (min)	175
2N3704	NPN	30	—	—	600	—		100 (min)	250
2N3904	NPN	40	—	—	10	—		100 (min)	200
2N3906	PNP	20	—	—	10	—		100 (min)	250
2N3906	PNP	40	40	5.0	200	1.5	60	—	250
2N4037	PNP	40	60	7.0	1000	5.0	—	50	—
2N4125	PNP	30	—	—	200	—		50 (min)	200
2N4126	PNP	25	—	—	200	—		120 (min)	200
2N4401	NPN	40	60	6.0	600	0.625	20	100	250
2N4403	PNP	40	40	5.0	600	0.625	30	100	200
2N4400	NPN	40	—	—	600	—		20 (min)	200
2N5087	PNP	50	—	—	50	—		40 (min)	40
2N5088	NPN	30	—	—	50	—		50 (min)	50
2N5415	PNP	200	200	4.0	1000	10.000	—	30	15

General-Purpose Power Bipolar Transistors

DEVICE	TYPE	V_{CEO} MAX (V)	I_C MAX (A)	P_D (W)	H_{FE} (MIN)	F_T (MHz)
2N5172	NPN	25	10	360	100	100
2N5210	NPN	50	50	625	250	30
2N5307	NPN-D	40	0.3	400	2000	60
2N5308	NPN-D	40	0.3	400	7000	60
2N5400	PNP	120	0.6	625	30	100
2N5401	PNP	150	0.6	625	40	100
2N5415	PNP	260	50	5	30	15
2N6036	PNP-D	80	4	40	750	25
2N6038	NPN-D	60	4	40	750	25
2N6043	NPN-D	60	8	75	1000	4
2N6052	PNP-D	100	12	150	750	4
2N6284	NPN-D	100	20	160	750	4
2N6287	PNP-D	100	20	160	750	4
2N6388	NPN-D	80	10	65	1000	20
2N6668	PNP-D	80	10	65	1000	20
TIP29C	NPN	100	1.0	30	40	—
TIP30C	PNP	100	1.0	30	40	—
TIP31C	NPN	100	3	40	25	—
TIP32C	PNP	100	3	40	25	—
TIP35C	NPN	100	25	125	25	—
TIP36C	PNP	100	25	125	25	—
TIP102	NPN-D	100	8	80	2500	—
TIP107	PNP-D	100	8	80	2500	—
TIP110	NPN-D	60	4	60	500	—
TIP112	NPN-D	100	4	50	500	—
TIP117	PNP-D	100	4	50	500	—
TIP120	NPN	60	5	65	1000	>5
TIP142	NPN-D	100	10	125	500	—
TIP147	PNP-D	100	10	125	500	—
D4H11	NPN	80	10	50	40	50
D44H10	PNP	80	15	83	40	50
MJ11015	PNP-D	120	30	200	1000	4
MJ11016	NPN-D	120	30	200	1000	4
MJ11032	NPN-D	120	50	300	1000	—
MJ11033	PNP-D	120	50	300	1000	—
MJE13007	NPN	400	8	80	8	4
MJE200	NPN	25	5	15	70	65
MJE210	PNP	20	5	15	70	65

Selection of RF Transistors

DEVICE	TYPE	MAX V_{CEO} (V)	MAX I_C (mA)	GAIN (dB)	FREQ. (MHz)	PACKAGE TYPE
MPS5175	NPN	12	50	—	2000	TO-92
MPSH10	NPN	25	—	—	650	TO-92
MPSH17	NPN	12	—	—	800	TO-92
MPSH81	PNP	20	50	—	—	TO-92
MPS918	NPN	30	600	—	—	TO-92
MRF531	NPN	100	100	—	—	TO-39
MRF544	NPN	70	400	16.5	250	TO-39
MRF545	PNP	70	400	—	—	TO-39
MRF586	NPN	17	200	9.0	500	TO-39
MRF904	NPN	15	30	16	450	MICRO-X
MRF571	NPN	10	70	12	1000	MICRO-X
MRF901	NPN	15	30	12	1000	MICRO-X
BRF90	NPN	15	30	—	—	MICRO-T
BRF91	NPN	12	35	—	—	MICRO-T
BRF90	NPN	15	30	—	—	MICRO-T

Selection of Small-Signal JFETs

DEVICE	TYPE	BV_{GS} (V)	MAX $V_{GS,OFF}$ (V)	INPUT C (pF)	MAX I_D (mA)	APPLICATION
2N4338	N-JFET	50	−1	6	0.6	—
2N4416	N-JFET	30	−6	4	15	VHF/UHF amp, mix, osc.
2N5114	P-JFET	30	10	25	90	switch: R_{on} = 75 Ω (max)
2N5265- 2N5270	N-JFET	60 60	−3 −8	7 7	1 14	series of 6, 2N5358-64 P-JFET complement
2N5432	N-JFET	25	−10	30	—	switch: R_{on} = 5 Ω (max)
2N5358- 2N5364	P-JFET	40 40	3 8	6 6	1 18.6	2N5265-70; N-JFET compliment
2N5457- 2N5459	N-JFET	25 25	−6 −8	7 7	5 16	general purpose; 2N5460-2 P-JFET complement
2N5460- 2N5462	P-JFET	40 40	6 9	7 7	5 16	2N5457-9; N-JFET complement

DEVICE	TYPE	BV_{GS} (V)	MAX $V_{GS,off}$ (V)	INPUT C (pF)	MAX I_D (mA)	APPLICATION
2N5484 MPF106	N-JFET	25	−6	5	30	HF/VHF/UHF amp, mix, osc.
2N5486	N-JFET	25	−2	5	15	VHF/UHF amp, mix, osc.
U304	P-JFET	30	10	27	50	analog switch chopper common-gate VHF/UHF
U310	N-JFET	30	−6	2.5	60	amp
U350	Quad N-JFET	25	−6	5	60	matched JFETs

Selection of Power FETs

DEVICE	TYPE	BV_{DS} (V)	$R_{DS(ON)}$ MAX (Ω)	$V_{GS(TH)}$ MAX (V)	I_D MAX (A)	P_D	CASE
IRFZ30	N-channel	50	0.050	4	30	75	TO-220
IRFZ42	N-channel	50	0.035	4	50	150	TO-220
VN0610L	N-channel	60	6	2.5	0.27	—	TO-92
VN10KM	N-channel	60	6	2.5	0.3	1	TO-237
IR511	N-channel	60	0.6	4	2.5	20	TO-220AB
MTP2955E	P-channel	60	0.12	—	11.5	125	TO-220AB
ZVN2110B	N-channel	100	4	—	0.85	5	TO-39
ZVN3310B	P-channel	100	20	—	0.3	5	TO-39
IRF510	N-channel	100	0.6	4	2	20	TO-220AB
IRF520	N-channel	100	0.27	4	5	40	TO-220AB
IRF150	N-channel	100	0.055	4	40	150	TO-204AE
ZVN0120B	N-channel	200	16	—	0.42	5	TO-39
ZVN1320B	P-channel	200	80	—	0.1	5	TO-39
IRF620	N-channel	200	0.8	4	5	40	TO-220AB
IRF220	N-channel	200	0.4	4	8	75	TO-220AB
IRF640	N-channel	200	0.18	4	10	125	TO-220AB
VP1320N3	P-channel	200	0.6	3.5	0.15	—	TO-92
IR9640	P-channel	200	0.5	4	11	—	TO-220
IR820	N-channel	500	3	4	2.5		TO-220
VP0650N3	P-channel	500	25	4	0.1	—	TO-92

Selection of Op Amps

Type	Op amps per package	Supply Voltage Min (V)	Supply Voltage Max (V)	Input offset current, max (nA)	Input offset voltage, typical (μV)	Slew rate (V/μs)	Frequency, typical (MHz)	Max output current (mA)	Comments
324A	4	3	32	30	2	0.5	1	20	Popular, single-supply bipolar
349	4	10	36	50	1	2	4	15	
355B	1	10	36	0.2	3	5	2.5	20	JFET, popular
741	1	10	36	200	2	0.5	1.2	20	Classic chip; 1458 (quad), 348 (dual)
1436	1	10	80	10	10	2	1	10	High-voltage
1463		30	80	—	—	165	17	1000	High-voltage
4558	2	8	36	200	2	1	2.5	15	Bipolar
AD841K	1	10	36	200	0.5	300	40	50	Bipolar, high-speed
AD848J	1	9	36	15	0.5	300	250	25	Bipolar, high-speed
AD744C	1	9	36	0.02	0.1	75	13	20	High-speed, low-distortion JFET
CA3410A	4	4	36	0.01	3	10	5.4	6	High-speed MOSFET
HA5141A	1	2	40	10	0.5	1.5	0.4	1	low-power, single-supply bipolar
HA2541	1	10	35	7μA	—	280	40	10	High-speed, low distortion
HA2542	1	10	35	7μA	—	375	120	100	High-power
HA2544	1	10	33	2μA	6	150	33	35	High-speed
HA5151	1	2	40	30	2	4.5	1.3	3	Bipolar
ICL7641B	4	1	18	0.03	—	1.6	1.4	5	MOSFET, low voltage, general purpose
LF351	1	10	36	0.1	5	13	4	10	JFET, 353 = ual, 347 = quad
LF411	1	10	36	0.1	0.8	15	4	15	General purpose, low-noise JFET
LM10	1	1	45	0.7	0.3	0.12	0.1	20	Low voltage, precision
LM11	1	5	40	10 pA	0.1	0.3	0.5	2	Precision, low bias
LM12	1	20	80	—	—	9	0.7	10000	High-power
LM308	1	10	36	1	2	0.15	0.3	5	Precision, low-bias bipolar
LM312	1	10	40	1	2	0.15	0.3	5	Compensated 308
LM318	1	10	40	200	4	7	15	10	Classic chip
LM343	1	10	68	10	2	2.5	1	10	High-voltage
LM344	1	10	68	19	2	30	10	10	High-voltage
LM833	2	10	36	200	0.3	7	15	10	Bipolar
LM6364	1	5	36	2μA	2	300	160	30	High-speed, bipolar
LT1006A	1	2.7	44	0.5	0.04	0.4	1	20	Bipolar, single-supply, precision
LT1028A	1	8	44	50	0.01	15	75	20	Bipolar precision, low-noise
LT1013C	2	4	44	2	0.06	0.4	0.8	25	Bipolar, single-supply
MC33078	2	10	36	150	0.15	7	16	20	Bipolar
MC34071A	1	3	44	50	0.5	10	4.5	25	Bipolar

TYPE	OP AMPS PER PACKAGE	SUPPLY VOLTAGE MIN (V)	SUPPLY VOLTAGE MAX (V)	INPUT OFFSET CURRENT, MAX (nA)	INPUT OFFSET VOLTAGE, TYPICAL (µV)	SLEW RATE (V/µs)	FREQUENCY, TYPICAL (MHz)	MAX OUTPUT CURRENT (mA)	COMMENTS
MC34181	1	3	36	0.05	0.5	10	4	8	JFET, high-speed, low power, low distortion
NE5534	1	6	44	300	0.5	6	10	20	Bipolar
OP-07E	1	6	44	3.8	0.03	0.17	0.6	10	Precision, low noise
OP-37E	1	8	44	35	0.01	17	63	20	Precision, low noise
OP-77E	1	6	44	1.5	0.01	0.3	0.6	12	Improvement over OP-27
OP-90E	1	1.6	36	3	0.05	0.01	0.02	6	Low-power
OP-97E	1	4.5	40	0.1	0.01	0.2	0.9	10	Low-power
TL051C	1	10.5	36	0.1	0.6	24	3	30	JFET, high-speed, low distortion
TL061C	1	4	36	0.2	3	3.5	1	5	JFET, low-power
TLC272A	2	3	18	1 pA	—	4.5	2.3	10	CMOS, low-power
TLC279C	4	3	18	0.1 pA	0.4	4.5	2.3	10	Quad CMOS

Common 4000 Series Logic ICs

4001	Quad 2-input buffered NOR gate	4051	8-channel analog multiplexer/demultiplexer
4002	Dual 4-input NOR gate	4052	Dual 4-channel analog multiplexer/demultiplexer
4006	18-stage static shift register	4053	Triple 2-channel analog multiplexer/demultiplexer
4007	Dual complementary pair and inverter	4063	4-bit magnitude comparator
4009	Hex inverting buffer	4066	Quad bilateral switch
4010	Hex noninverting buffer/converter	4068	8-input NAND gate
4011	Quad 2-input buffered NAND gate	4069	Input protected hex inverter
4012	Dual 4-input NAND gate	4071	Quad 2-input buffered OR gate
4013	Dual D flip-flop	4072	Dual 4-input buffered OR gate
4014	8-bit static shift register	4073	Triple 3-input buffered AND gate
4015	Dual 4-bit static shift register	4075	Triple 3-input buffered OR gate
4016	Quad bilateral switch	4077	Quad 2-input EXCLUSIVE-NOR gate
4017	5-stage decade counter/divider	4078	8-input buffered NOR gate
4018	Presettable divide-by-*N* counter	4081	Quad 2-input buffered AND gate
4020	14-stage ripple carry binary counter	4082	Dual 4-input buffered AND gate
4021	8-bit static shift register	4093	Quad 2-input NAND Schmitt trigger
4022	Divide-by-8 counter/divider with 8 decimal outputs	4094	8-stage shift-and-store bus register

Common 4000 Series Logic ICs *(Continued)*

4023	Buffered triple 3-input NAND gate	4099	8-bit addressable latch
4024	7-stage ripple carry binary counter	4511	BCD to 7-segment latch/decoder/driver
4025	Triple 3-input NOR gate	4512	8-channel buffered data selector
4027	Dual JK flip-flop	4514	4-bit latched/4-to-16 line decoders
4028	BCD to decimal decoder	4515	4-bit latch/4-to-16 line decoder
4029	Synchronous up/down counter, binary/decade counter	4516	Binary up-own counter
4030	Quad EXCLUSIVE-OR gate	4518	Dual 4-bit decoder counter
4040	12-stage ripple carry binary counter	4520	Dual 4-bit counter
4042	Quad D-clocked latch	4521	24-stage frequency divider and oscillator
4043	Quad cross-couple NOR R/S 3 state latch	4528	Dual monostable multivibrator
4047	Monostable/astable multivibrator	4538	Dual precision monostable multivibrator
4049	Hex inverting buffer	4584	Hex Schmitt-trigger
4050	Hex noninverting buffer	4585	Magnitude comparator

Common 7000 Series Logic ICs

7400	Quad 2-iput NAND gate	74138	3-line to 8-line decoder/demultiplexer
7402	Quad 2-input NOR gate	74139	Dual 2-line to 2-line decoder/demultiplexer
7404	Hex Inverter	74145	BCD-to-decimal decoder/driver
7406	Hex Inverter/buffer diver	74148	8-line to 3-line priority encoder
7408	Quad 2-input positive AND gate	74150	16-bit data selector
7410	Triple 3-input NAND gate	74151	Data selector multiplexer
7411	Triple 3-input AND gate	74153	Dual 4-line to 1-line data selector/multiplexer
7414	Hex Schmitt-trigger inverter	74155	Dual 2-line to 4-line decoder/demultiplexer
7420	Dual 4-input NAND gate	74156	Dual 2-line to 4-line decoder/demultiplexer
7421	Dual 4-input AND gate	74158	Quad 2-line to 1-line multiplexer
7426	Quad 2-input NAND gate	74159	4-line to 16-line decoder/demultiplexer
7427	Triple 3-input NOR gate	74161	Synchronous 4-bit binary counter
7430	8-input NAND gate	74163	Fully synchronous 4-bit binary counter
7432	Quad 2-input OR gate	74164	8-bit parallel-out serial shift register
7433	Quad 2-input NOR buffer	74166	Parallel load 8-bit shift register
7438	Quad 2-input NAND buffer	74169	Synchronous 4-bit up/down counter

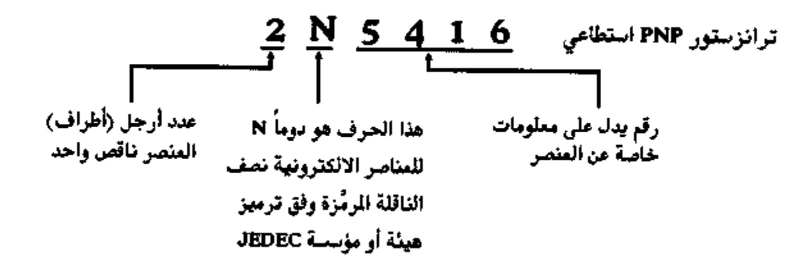
7442	4-line to 10-line decoder (1 of 10)	74378	Hex D-type flip-flop
7445	BCD-to-decimal decoder/driver	74390	Dual decade counter
7447	BCD 7-segement decoder/driver	74293	Dual 4-bit decade and binary counter
7451	Dual 2-wide 2-input AND-OR-invert gate	74173	Quad D-type flip-flop 3-state output
7473	Dual JK master slave flip-flop with clear	74174	Hex D-type flip-flop with clear
7474	Dual D-type positive edge-triggered flip-flop	74175	Quad D-type flip-flop with clear
7475	4-bit bistable latch	74191	Synchronous up-down 4-bit counter
7485	4-bit magnitude comparator	74193	Synchronous 4-bit up/down counter
7486	Quad 2-input exclusive OR gate	74194	4-bit bi-directional shift register
7492	Divide-by-12 counter	74195	4-bit parallel access shift register
74107	Dual JK master slave flip-flop	74221	Dual monostable multivibrator with Schmitt-trigger input
74109	Dual JK positive-edge-trig. flip-flop	74240	Octal buffers/drivers with 3-state output
74112	Dual JK negative-edge-triggered flip-flop	74241	Octal bus/line driver
74121	Monostable multivibrator	74243	Quad bus transceiver
74122	Retriggerable monostable multivibrator	74244	Octal buffer, line driver, line receiver
74123	Dual retriggerable monostable multivibrator	74245	Octal bus transceiver with 3-state output
74124	Dual voltage controlled oscillator	74251	Data selector/multiplexer with 3-state output
74125	Quad 3-input buffer with 3-state output	74253	Dual 4-line-to-1 line data selector/multiplexer with 3-state output
74126	Quad 3-state buffer	74257	Quad 2-to-1-line selector/multiplexer with 3-state output
74128	Quad 2-input NOR driver	74258	Quad 2-to-1-line selector/multiplexer with 3-state output
74132	Quad 2-input NAND with Schmitt trigger	74259	8-bit addressable latch
74136	Quad 2-input XOR gate	74521	Octal comparator
74266	Quad 2-input XOR gate	74540	Octal buffer/line driver
74273	Octal D-type flip-flop with clear	74541	Octal buffer/line driver
74279	Quad S-R latch	74573	Octal D-type latch with 3-state output
74280	9-bit odd-even parity generator/checker	74574	Octal D-type flip-flop 3-state output
74283	4-bit binary full adder	74590	8-bit binary counter with 3-state output registers
74298	Quad 2-innput multiplexer with storage	74595	8-bit shift registers with output latches
74348	8-line-to-3-line priority encoder with 3-state output	74640	Octal inverting bus transceiver

Common 7000 Series Logic ICs *(Continued)*

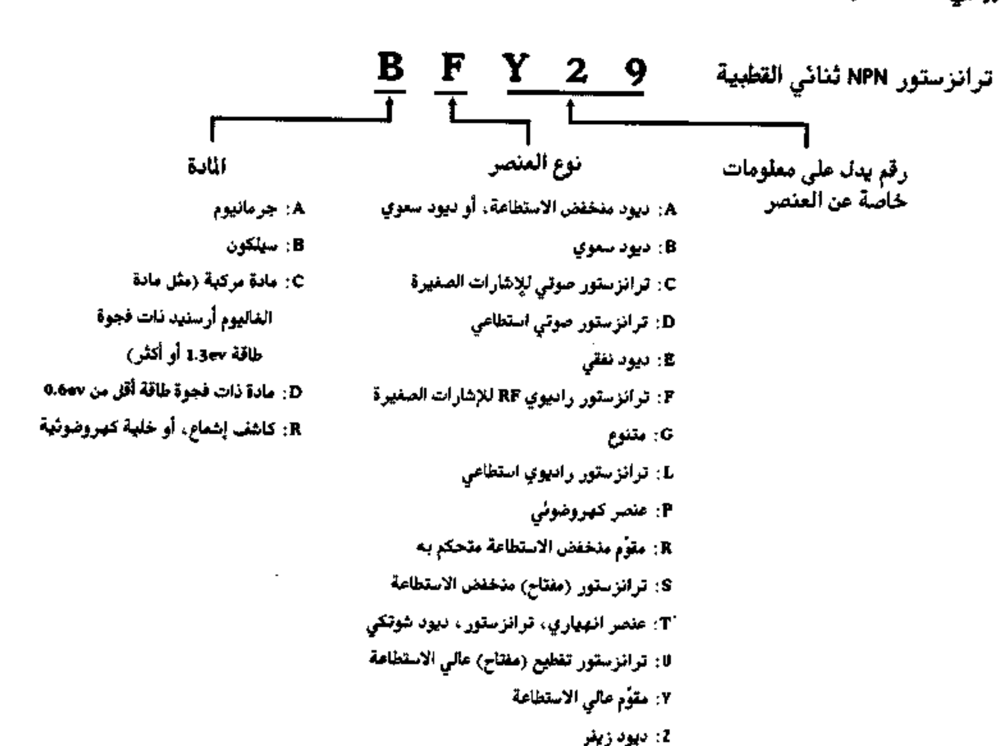
74365	Hex bus driver with 3-state output	74641	Octal non-inverting bus transceiver
74367	Hex buffer/driver, true data	74645	Octal noninverting bus transceiver 3-state output
74373	Octal transparent latch	74646	Octal bus transceiver an register 3-state output
74374	Octal D-type flip-flop	74670	4 × 4 register file with 3-state output
74375	Quad latch	74688	8-bit identity comparator

الترميزات التي تكتب على العناصر الإلكترونية المصنوعة من أنصاف النواقل

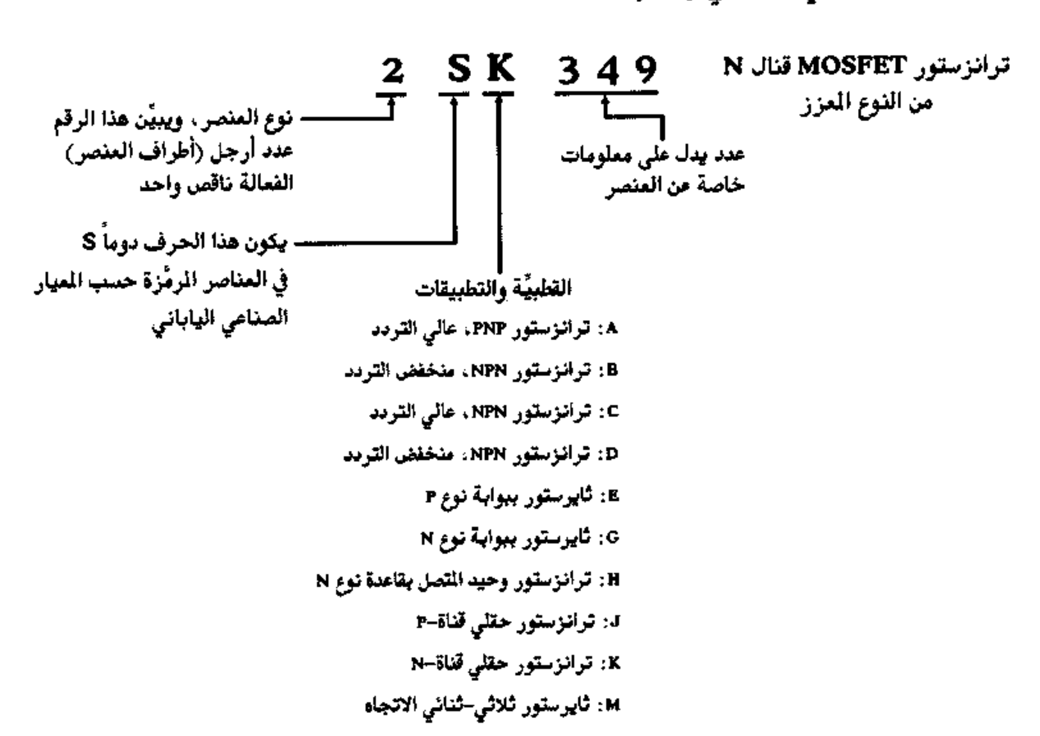
ترميز مجلس هندسة العناصر الإلكترونية (ترميز JEDEC)



الترميز الاوروبي للعناصر نصف الناقلة (PRO Electron Code)



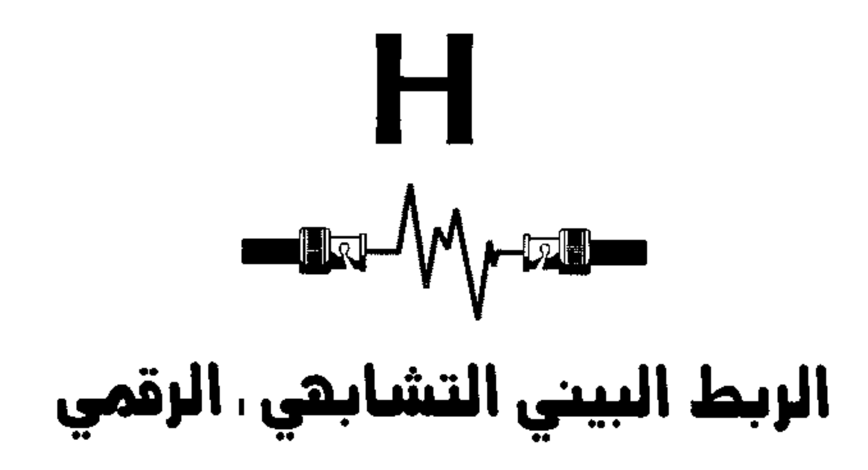
الترميز وفق المعيار الصناعي الياباني (JIS)



تتوفر كتالوكات مرجعيَّة جيدة لأنصاف النواقل (كالكتالوك NTE) وتحوي هذه الكتالوكات المرجعيَّة لوائح بالعناصر الإلكترونية المصنوعة من أنصاف النواقل أوروبية ويابانية المنشأ مع مكافئاها الأمريكيَّة.

وتوجد العديد من العناصر الإلكترونية التي لا تتبع الترميز الوارد سابقاً، وإنما يُستخدم فيها ترميز خاص بالشركة الصانعة فمثلاً تستخدم شركة موتورولا Motorola الترميز (MJ XXXX) للترانزستورات الاستطاعية ذات الغلاف المعدني والترميز (MPS XXXX) للترانزستورات منخفضة الاستطاعة ذات الغلاف البلاستيكي والترميز (MRF) للترانزستورات الميكرويّة (المخصصة للعمل في مجالات الأمواج الميكرويّة Microwave ولترانزستورات الـ HF والـ VHF.

وكذلك فإن شركة Texas Instruments تستخدم الترميز (TIP XXXX) للترانزستورات الاستطاعية ذات الغلاف البلاستيكي و(TI XXXX) للترانزستوارت منخفضة الاستطاعة (ذات الغلاف البلاستيكي أيضاً).



الربط البيني التشابهي ، الرقمي

هناك طرق عديدة لربط الدارات التشابهية مع الدارات الرقمية وستتعرف في هذا الملحق على نوعين أساسيين من الربط البيني. يتعامل النوع الأول مع القدح البسيط (on/off) وأما النوع الثاني فيعالج الربط الحقيقي بين الدارات التشابهية والدارات المنطقية والذي يعتمد على التحويل التشابهي الرقمي (analog-to digital conversion) وعلى التحويل الرقمي التشابهي (digital-to analog conversion)، حيث يتم في التحويل A/D تحويل الإشارات التشابهية إلى إشارات رقميَّة وفي التحويل D/A تحويل الإشارات الرقميَّة إلى إشارات تشابهيَّة.

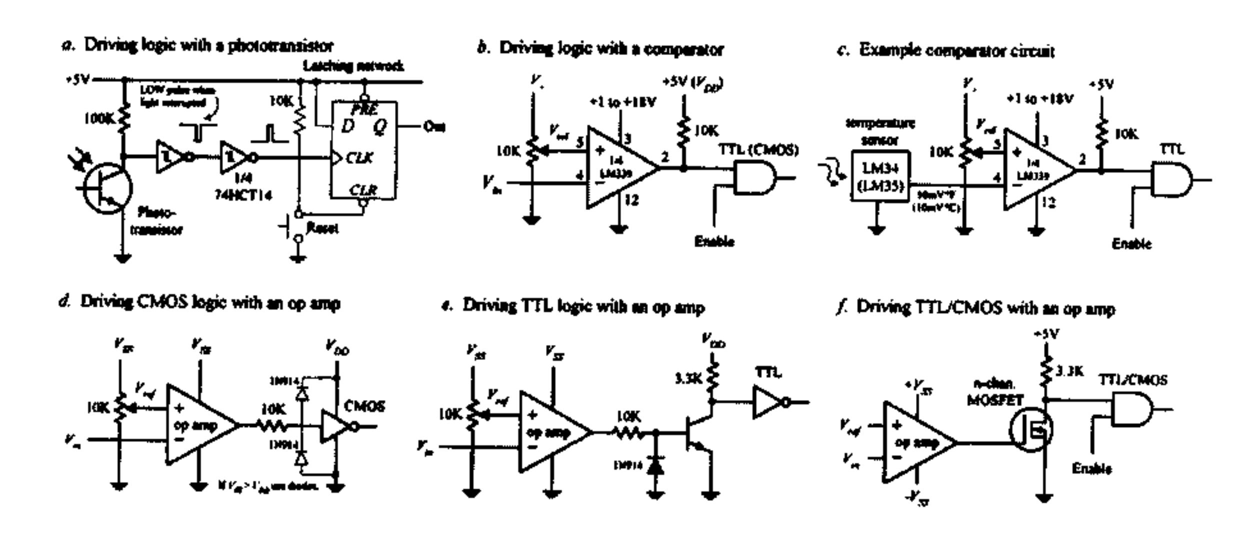
1.H قدح استجابات منطقية بسيطة من إشارات تشابهية

تحتاج أحياناً لقيادة دارة منطقية من إشارات on/off بسيطة تولدها عناصر تشابهية (analog devices)، فمثلاً قد ترغب في تشغيل إنذار بواسطة قلاب ماسك (latch Flip-Flop) عندما يصل جهد تشابهي ــ يتم توليده مثلاً بواسطة دارة حساس حرارة ــ إلى مستوى عتبة محدَّد، أو ربما تريد ببساطة عَد (Count) المرات التي يتم فيها الوصول إلى مستوى عتبة تشابهي محدَّد. في مثل هذه التطبيقات البسيطة يتم عادة استخدام مقارن (comparator) أو مضخم عملياتي للربط البيني (interfacing) بين الدارات التشابهية والدارات الرقمية، ومن الممكن غالباً استخدام دارة مقسم جهد (voltage divider) مكون من مبدِّل طاقة (transducer) متغيِّر المقاومة ومن مقاومة شد (pull-up resistor)، ويبيِّن الشكل (1.H) بعض الدارات كأمثلة توضح هذه النقطة.

يستخدم في دارة الشكل (1a.H) ترانزستور ضوئي لقدح استجابة منطقيِّة.

يُضاء الترانزستور الضوئي في حالة العمل الطبيعي مما يجعل جهد دخل عاكس قادح شميت الأول في حالة (Low) ويكون خرجه (high) وبالتالي فإن خرج عاكس قادح شميت الثاني يكون في حالة (Low). عند انقطاع الإضاءة عن الترانزستور ينتقل الترانزستور إلى حالة (off) ويصبح جهد دخل العاكس الأول high وخرجه Low فينتقل خرج العاكس الثاني إلى حالة (high) ويستفاد من هذا الانتقال لخرج العاكس الثاني من (Low) إلى (high) لتشغيل قلاب D ماسك فيصبح خرجه high لأن دخله D موصول إلى high ويمكن استخدام الخرج (out) لتفعيل إضاءة LED أو لتشغيل رنان (buzzer).

في دارة الشكل (1b-H) يستخدم مقارن مغذى من مصدر تغذية وحيد وخرجه من نوع المجمع المفتوح (open collector) كأداة ربط بين إشارة تشابهية ودارة رقميَّة. عندما يزيد الجهد التشابهي المطبق على (V_{in}) عن الجهد المرجعي (V_{ref}) المطبق على المدخل غير العاكس (+) للمقارن عبر مقسم جهد فإن خرج المقارن يصبح (Low) ويمكن أن يمتص هذا الخرج تياراً، أما عندما يكون ($V_{in} < V_{ref}$) فإن خرج المقارن يصبح (high) بسبب مقاومة الشد.



الشكل (1.H): الربط البيني البسيط للدارات التشابهية مع الرقمية.

يبيِّن الشكل (c1.11) تطبيقاً بسيطاً للمقارن حيث يتم توليد جهد الدخل بواسطة حساس حرارة LM34 أو LM35، والحساس LM34 يولد 10 mV/°F أما LM35 فيولد 10 mV/°C، أما الجهد المرجعي فيتحدد بالجهد (+V) وبالمقاومة المتغيرة. إذا أردنا أن نقود خرج المقارن إلى حالة (Low) عند درجة الحرارة 75 °C فإننا نضبط الجهد المرجعي على 750 mV، وذلك بفرض أننا نستخدم الحساس LM35.

يُستخدم مضخم عملياتي كمقارن في الدارة (1d.H) لتأمين التوافق بين إشارة تشابهيَّة ومدخل دارة رقميَّة. يُطبق خرج المقارن عبر مقاومة إلى مدخل عاكس من عائلة CMOS، وإذا كان جهد تغذية المقارن أكبر من الجهد V_{DD} يجب استخدام ديودات حماية (انظر الشكل).

في دارة الشكل (1e.H) يستخدم مضخم عملياتي ومرحلة ترانزستورية لقيادة بوابة عاكس من عائلة TTL والديود الموجود في الدارة يعمل على حماية متصل القاعدة باعث للترانزستور من الانهيار. عندما يكون V_{in} أكبر من V_{ref} ينتقل خرج المضخم العملياتي إلى حالة (Low) ويكون الترانزستور في حالة (off) ويُطبق جهد (high) على دخل العاكس.

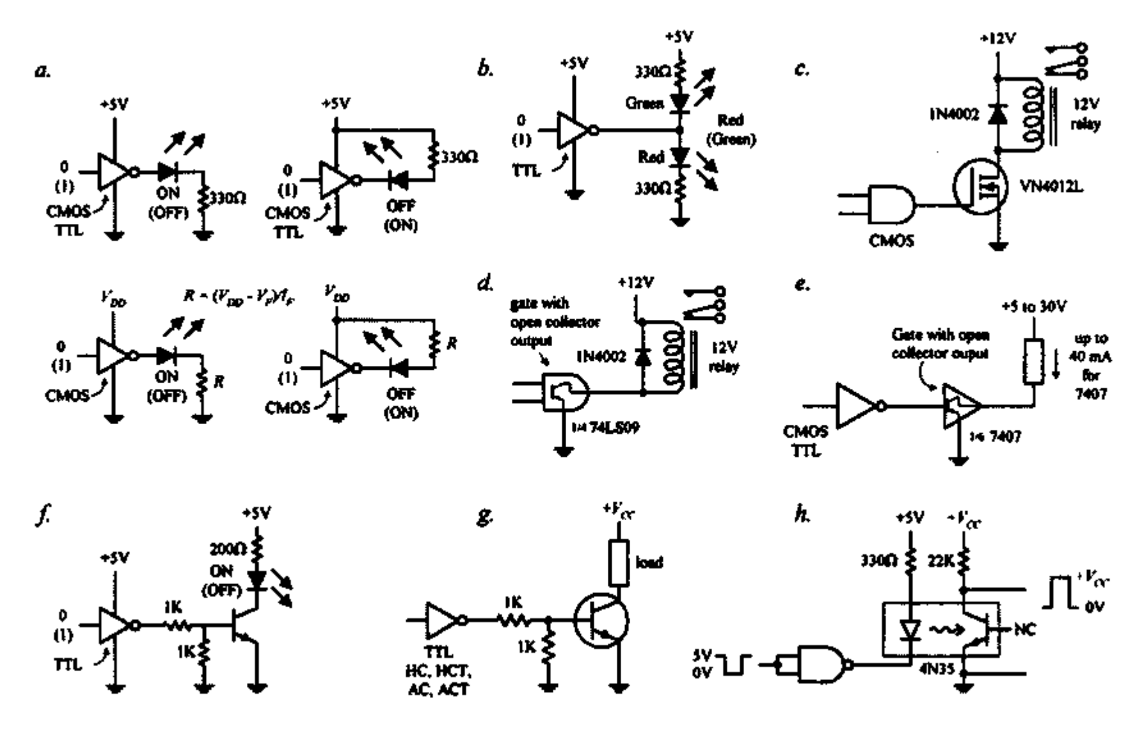
يستخدم ترانزستور MOSFET قنال n في الشكل (1f.11) كمرحلة خرج للمضخم العملياتي.

2.H استخدام الدارات المنطقية لقيادة أحمال خارجيَّة

إن قيادة الأحمال البسيطة كالديودات المصدرة للضوء LEDs أو الحواكم، أو الرنانات، أو أية أجهزة أخرى تعمل في إحدى حالتي (on) أو off يعتبر أمراً بسيطاً، وعند قيادة هذه الأحمال يجب التأكد من مواصفات تيار خرج أداة (عنصر) القيادة المنطقي. أي يجب معرفة مقدار التيار الذي تستطيع البوابة أن تعطيه من خرجها أو تمتصه عبر خرجها. وبعد ذلك يتم تحديد مقدار التيار الذي يحتاجه الجهاز المقاد. إذا كان الجهاز يحتاج إلى تيار أكبر من تيار خرج البوابة يمكن استخدام ترانزستور كمفتاح خرج ويبيِّن الشكل (2.H) بعض نماذج الدارات المستخدمة لقيادة أحمال مختلفة.

يبيِّن الشكل (2a.H) حالة قيادة ديود مصدر للضوء LED مباشرة من خرج بوابة عاكسة نوع TTL ويبيِّن الشكل نموذجين، اليساري وفيه يتم إصدار تيار من خرج البوابة ليمر عبر الديود ومقاومة تحديد وذلك عندما يكون الخرج high، ويصدر الـ LED الضوء إذا كان الخرج high، أما في النموذج الثاني فإن الديود LED يصدر الضوء عندما يكون الخرج (Low) حيث يمر تيار عبر الديود ومقاومة التحديد وخرج العاكس ومن الأفضل استخدام التوصيلة التي يتم فيها امتصاص التيار

عبر خرج العاكس إذا كان العاكس نوع TTL. يختلف الجهد الأمامي للـــ LED بين (1) و(2 V) والتيار بين (1) و(20 mA) لذلك نختار مقاومة التحديد من العلاقة $R = (V_{DD} - V_F)/I_F$. إذا كان الديود يحتاج تياراً أعلى من تيار خرج العاكس، فإننا نستخدم مرحلة خرج ترانزستورية كما في الشكل (2f.H).



الشكل (2.H): استخدام البوابات المنطقية لقيادة أحمال خارجية.

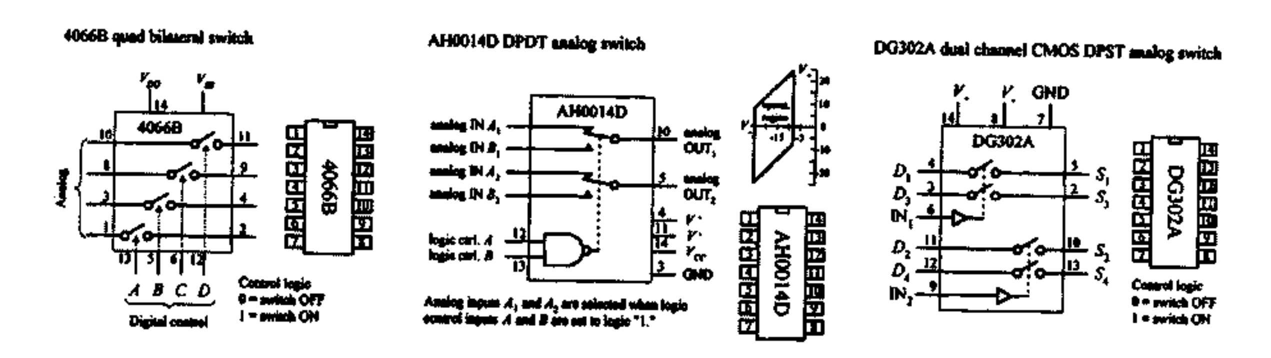
يبيِّن الشكل (2b.H) كيفية الحصول على إضاءة متعاقبة من ديودي LED موصولين إلى خرج بوابة عاكس. يتوهج الديود الأحمر عندما يكون الخرج high وفي هذه الحالة يكون الديود الأخضر في حالة (off)، وعندما يصبح الخرج Low ينتقل الديود الأحمر إلى حالة (off) ويتوهج الديود الأخضر. لا يمكن استخدام خرج البوابة المنطقية مباشرة لقيادة حاكمة (Relay) لأن ملف الحاكمة يستهلك تياراً عالياً ولذلك يوصل ترانزستور MOSFET مع خرج البوابة ويُوصل ملف الحاكمة بين (+ 12 V) ومصرف الترانزستور. يستخدم ديود موصول على التوازي مع ملف الحاكمة كما في الشكل (2c.H) لحماية الترانزستور من ومضات التيار الناتجة عن انتقال الحاكمة من (off) إلى (on). يمكن أيضاً استخدام بوابة بخرج من نوع المجمع المفتوح لا يمكنها إعطاء تيار إلى الحمل وهي فقط تستطيع امتصاص تيار يصل إلى (10) أضعاف تيار البوابات العادية وتستخدم في الشكل (2d.H) بوابة من نوع المجمع المفتوح لقيادة حاكمة.

يستحسن اختبار تيار خرج بوابات المجمع المفتوح قبل استخدامها للتأكد من قدرتها على تحمل التيارات. يبيِّن الشكل (2e.H) تطبيقاً آخر لبوابة بمجمع مفتوح، أما في الشكل (2f.H) فيستخدم ترانزستور ثنائي القطبيَّة لقيادة LED عالي التيار، وفي هذه الدارة يجب أيضاً التأكد من أن الترانزستور يتحمل التيار. إن دارة الشكل (2g.H) مشابهة للدارة (2f.H) ولكن الحمل فيها يمكن أن يكون من طبيعة مختلفة عن الـــ LED. تستخدم في الدارة الأخيرة من الشكل (2h.H) أداة ربط ضوئي (optocoupler) لقيادة حمل يتطلب عزلاً كهربائياً عن دارة القيادة المنطقيَّة ويكون العزل الكهربائي مفيداً عادة عندما يكون للأحمال الخارجية نظام أرضي مختلف.

يتحدد مستوى الجهد في طرف الحمل لأداة الربط الضوئي بالجهد Vcc، وتتوفر أنواع عديدة من أدوات الربط الضوئي (راجع الفصل الخامس).

3.H المفاتيح التشابهيّة

المفاتيح التشابهية هي دارات متكاملة ICs مصممة لتمرير أو فصل إشارات تشابهية بتحكم رقمي، وتتكون البنية الداخلية لهذه الدارات من عدد من بوابات التحكم المنطقيّة المرتبطة بمراحل ترانزستوريَّة مستخدمة للتحكم بعبور الإشارات التشابهيَّة. يبيِّن الشكل (3.H) نماذج عديدة من المفاتيح التشابهيَّة. الدارة المتكاملة CMOS 4066B هي دارة مفاتيح تشابهيَّة وتحوي بداخلها أربعة مفاتيح ثنائية الاتجاه. تغذى الدارة من مصدر تغذية وحيد يتراوح بين (3) إلى (5) فولت ويمكن لهذه الدارة أن تمرر الإشارات التشابهيَّة أو الرقمية في المجال الجهدي V 7.5 ± ويبلغ تبديد الاستطاعة الأعظمي للدارة المتكاملة حوالي (700 mW). يتم التحكم بالمفاتيح بواسطة إشارات دخل منطقيَّة (A)، (B)، (C) و(D). تتوفر دارة مناظرة لدارة 4066 من عائلة TTL وهي الدارة المتكاملة AH0014D DPDT وهي عبارة عن مفتاح تشابهي ثنائي القطب ثنائي الوضع DPDT وتستطيع هذه الدارة التعامل مع إشارات تشابهية في المجال V 10 ± ويتم التحكم بعمل المفتاح عن طريق البوابة المنطقية ذات المداخل (A) و(B). للدارة جهود تغذية منفصلة فالجهود (+V) و(-V) هي جهود تغذية للقسم التشابهي من الدارة أما +Vcc وGND فهي على الترتيب جهد التغذية الرقمي والأرضي الرقمي. تحوي الدارة المتكاملة DG302A على مفتاحين من نوع DPST وتستطيع هذه المفاتيح تمرير إشارات تشابهية ورقميّة في المجال V 10 ± بسرعات فتح وإغلاق تصل إلى (15 ns).



الشكل (3.H): أنواع مختلفة من دارات متكاملة تعمل كمفاتيح تشابهية.

تستخدم المفاتيح التشابهية في عدة أنواع من الدارات مثل دارات التعديل والكشف، ودارات التحكم الرقمي بالتردد، ودارات التحكم بربح الإشارات التشابهيّة، وكذلك في دارات التحويل (التبديل) التشابهي إلى رقمي حيث تستخدم عادة كمفاتيح أخذ عينات ومسكها (Sample and hold switches)، ويمكن ببساطة استخدام هذه المفاتيح لتشغيل أو لتوقيف عنصر تشابهي عن العمل.

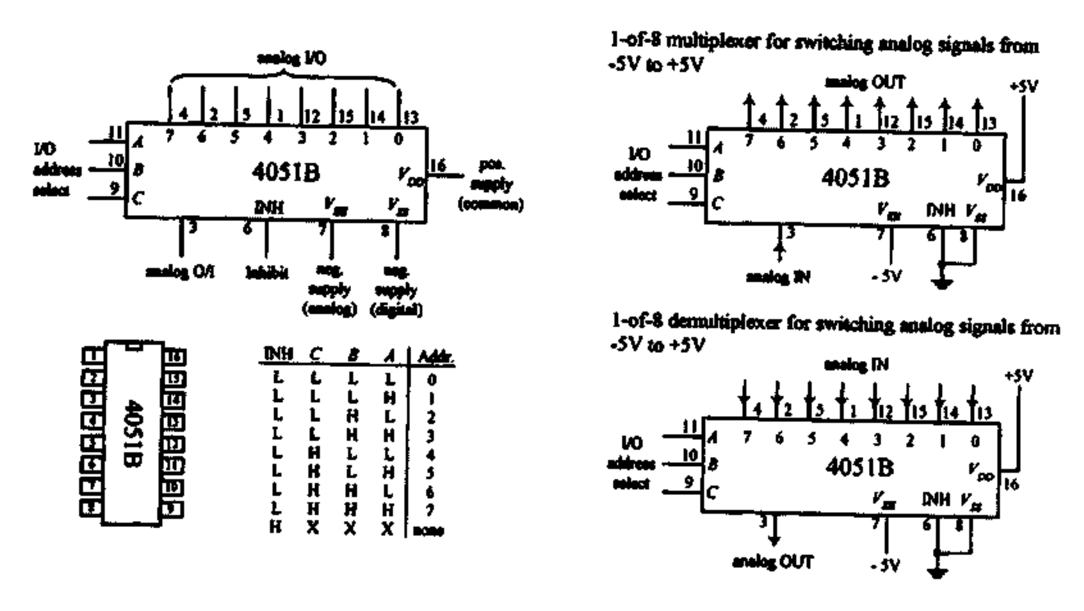
4.H النواخب/الموزعات التشابهية

تذكر من الفقرة (3.12) أن الناخب الرقمي يعمل كناخب معطيات، وأن الموزع الرقمي يعمل كموزع معطيات. تعمل النواخب والموزعات التشابهية بنفس الطريقة ولكنها قادرة على انتخاب وتوزيع الإشارات التشابهيّة.

وتستخدم مداخل انتخاب رقمية لتحديد المسار الذي يكون في حالة فتح (Open) والمسار الذي يكون في حالة إغلاق (Closed) في طريق الإشارات.

تعتبر الدارة المتكاملة 4051B نموذجاً شائعاً عن دارات النواخب والموزعات التشابهيّة، لأن مداخلها ومخارجها ثنائية الاتجاه (يمكن أن تمر الإشارات بالاتجاهين). عند استخدام الدارة المتكاملة كناخب تطبق الإشارات التشابهيّة على خطوط

الدخل/خرج (I/O) المرقمة من (0) حتى (7) أما الرمز الرقمي (digital code) الذي ينتخب الدخل الذي يمر إلى الخرج (خط O/I — الرجل 3)، فإنه يُطبق على المداخل A، B وC (انظر جدول الحقيقة المعطى مع الشكل). عند استخدام الدارة كموزع (demultiplexer) تُعكس التوصيلات حيث يبقى الدخل التشابهي على الرجل (3) والتي تُسمى analog O/I line ويمر إلى أحد المخارج (I/O) ويتم اختيار الخرج الذي تذهب إليه الإشارة بواسطة المداخل A، B وC. عندما يكون خط (INH) في حالة (high) لا يتم اختيار أيٍّ من العناوين.



INH	C	B	A	Addr.
L	L	L	L	0
L	L	L	H	1
L	L	H	L	2
L	L	H	H	3
L	H	L	L	4
L	H	L	H	5
L	H	H	L	6
L	H	H	H	7
H	X	X	X	none

الشكل (H.4): الناخب/الموزع التشابهي 4051B.

تتعلق مستويات إشارات الدخل والخرج التشابهيّة التي تتعامل معها الدارة 4051B بقيم جهود التغذية (V_{DD}) و(V_{EE})، أما الرجل V_{SS} فتوصل مع الأرض. إذا كانت الإشارات التشابهية موجبة دوماً يمكن وصل V_{EE} وV_{SS} مع بعضها إلى الأرض. إذا كنت ستتعامل مع إشارات تتأرجح بين (+5 V) و(-5 V) فإن جهود التغذية يجب أن تكون (V_{DD} = +5 V) و(V_{EE} = -5 V). تقبل الدارة 4051B إشارات رقمية من (3) إلى 15 فولت وتتعامل مع إشارات تشابهية في المجال من (-15 V) حتى (+15 V).

5.H التحويل التشابهي إلى رقمي والرقمي، إلى تشابهي

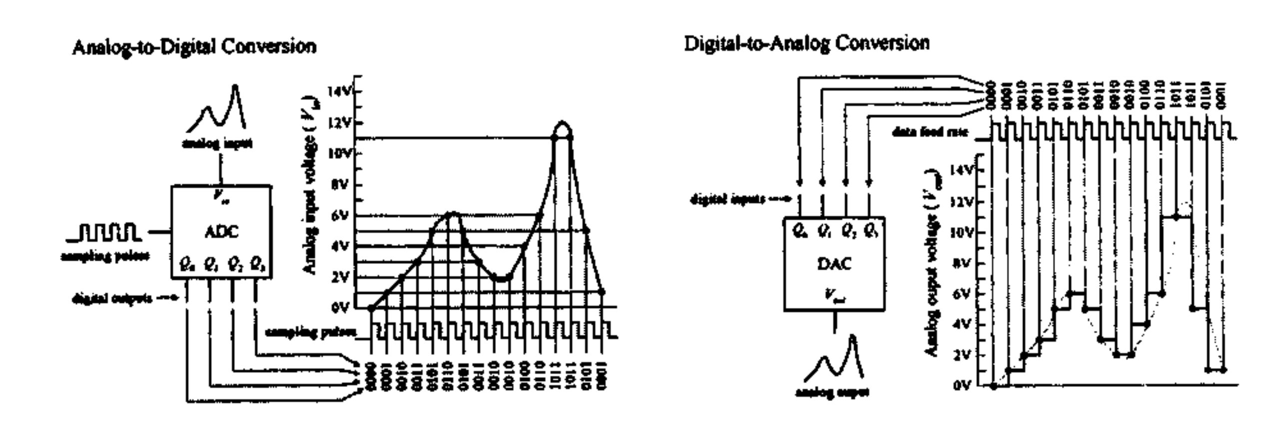
يستخدم التحويل التشابهي إلى رقمي (والذي سنسميه للاختصار التحويل التشابهي الرقمي A/D) عندما نحتاج لربط دارات تشابهية تحوي عناصر مثل المصوات، أو حساس الحرارة، أو حساس إجهاد، أو حساس موضع، أو مقياس ضوء، أو غيرها مع دارات رقميَّة وبأسلوب يتجاوز حالة العمل البسيطة الواردة في الفقرات السابقة والتي كانت تقتصر على تشغيل الدارة الرقميّة عندما تتجاوز الإشارة التشابهية مستوى عتبة محدد.

والمبدل التشابهي الرقمي (ADC) يحول الإشارة التشابهيَّة إلى سلسلة من الأعداد الرقميَّة وكل عدد يتناسب مع مستوى تشابهي مقاس في لحظة معينة. تُعطى الكلمات الرقمية (digital words) لمعالج صغري (microprocessor) أو لمتحكم (microcontrollers) حيث تعالج وتخزَّن وتفسر ويستفاد منها في عمليات لاحقة. يستخدم التحويل التشابهي الرقمي في نظم تحصيل البيانات (data-acquisition systems)، وفي التسجيل الرقمي للصوت، وفي أجهزة الاختبار البسيطة ذات الإظهار الرقمي (كمقاييس الضوء ومقاييس الحرارة). يستخدم التحويل الرقمي التشابهي (DAC) لكي يصبح بالإمكان

الاستفادة من الإشارات الرقميَّة في عالم الأجهزة التشابهية. وبتطبيق أعداد ثنائية متتالية على المبدل يتم تكوين إشارة تشابهية في الخرج. تستخدم المبدلات (DACs) للتحكم بربح المضخمات العملياتية التي يمكن استخدامها لتكوين مضخمات ومرشحات مقادة رقمياً، كما تستخدم أيضاً في مولدات الإشارات وفي دارات المعدلات وكبدائل لعناصر الضبط، وفي دارات المعايرة الآلية (autocalibration circuits) وفي غيرها من التطبيقات.

1.5.H أسس التبديل التشابهي الرقمي والرقمي التشابهي

يبيِّن الشكل (5.H) الفكرة الأساسية للتبديل التشابهي الرقمي وللتبديل الرقمي التشابهي، ففي المبدِّل التشابهي الرقمي تطبق إشارة تشابهيَّة ونبضات أخذ عينات على المبدِّل، وعند كل نبضة يقوم المبدل ADC بقياس الجهد التشابهي للدارة في تلك اللحظة ويعطي خرجاً رقمياً مكوناً من أربع خانات يتناسب مع الجهد التشابهي المقاس لحظة أخذ العينة ويمكن بالخانات الرقمية الأربعة أن تكون لدينا (16) حالة (0000 إلى 1111) وهي مناسبة مثلاً لتمثيل جهود من الصفر (0) وحتى (15) فولت.



الشكل (5.H): التبديل التشابهي الرقمي والرقمي التشابهي.

في التبديل الرقمي التشابهي تُطبق على المبدل سلسلة من الأعداد الثنائية (4-bit) ويُحدَّد معدَّل تطبيق هذه الأعداد على المبدِّل بالدارة المنطقيَّة التي تولد هذه الأعداد، ويتولد في خرج المبدِّل جهد تشابهي مقابل كل عدد ثنائي وكما هي الحال في المبدِّل ADC فإن لدينا الآن (16) عدداً ثنائياً ويقابلها (16) قيمة ممكنة لجهد الخرج التشابهي. يفتقد المبدلان المبينان في الشكل إلى الدقة الكافية لجعل الإشارة تبدو أكثر استمرارية وليس على شكل درج.

ولتحقيق ذلك يستخدم مبدل يعطي في خرجه (8-bit) بدلاً من (4-bit) أو يتعامل في دخله مع (8-bit) بدلاً من (4-bit)، يمكن استخدام (10-bit) أو (12-bit) أو (16-bit) أو حتى (18-bit). إذا كانت الأعداد في خرج المبدل من نوع (8-bit) فإن لدينا $256 = 2^8$ عدداً يقابلها (256) خطوة تشابهيَّة. إذا استخدم مبدل (8-bit) لتوليد (0 V) عند (0000 0000) و(15 V) عند (1111 1111)، فإن كل خطوة تشابهية ستكون (0.058 V) $\left(\frac{1}{256}\times 15\right)$، أما إذا كان المبدل يتعامل مع (16-bit) ويعطي جهداً يساوي (0) عند حالة (0000 0000 0000 0000 00) و15 فولت عند الرقم 1111 1111 1111 1111) (11)، فإن خطوة الجهد ستكون (0.000058 V) وكما تلاحظ فإن التحويل من رقمي إلى تشابهي يُعطي إشارة خرج مستمرة عملياً (practically continuous).

2.5.H مبدّل رقمي إلى تشابهي موزون ثنائياً بسيط

يبيِّن الشكل (6.H) دارة بسيطة لمبدل رقمي تشابهي (4-bit) والدارة مكونة من مفتاح مقاد رقمياً (74HC4066) ومن أربع مقاومات موزونة ثنائياً، ومن مضخم عملياتي. تعتمد الفكرة الأساسية على التحكم الرقمي بربح المضخم العملياتي بتغيير المقاومة R_{in}. تعمل المقاومات الموزونة ثنائياً والدارة المتكاملة للمفاتيح 74HC4066 كمقاومة (R_{in}) متحكم بها رقميًا، ويمكن لهذه المقاومة أن تأخذ (16) قيمة ممكنة. يمكن أيضاً اعتبار المقاومات الموزونة ثنائياً ودارة (4066) كمنبع تيار متحكم به رقمياً.

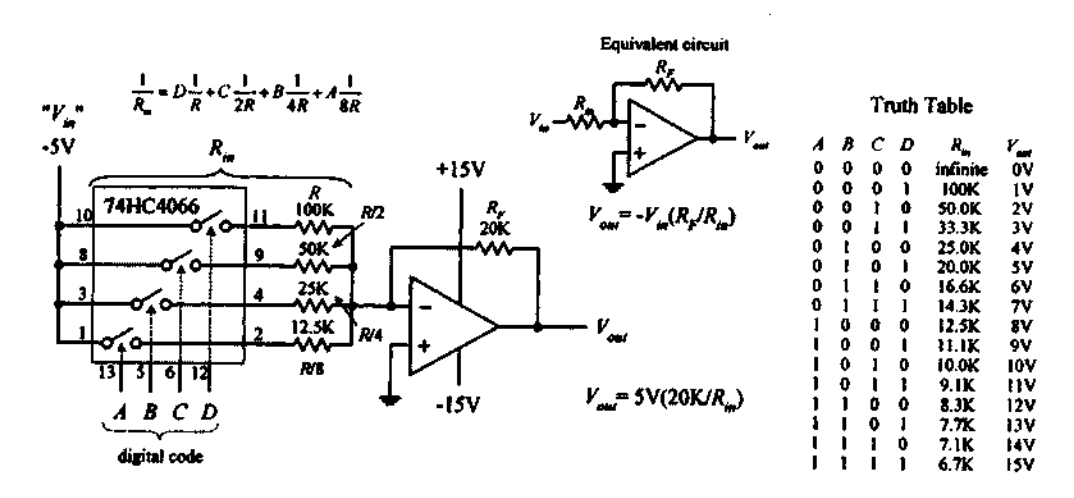
يؤدي تطبيق الأعداد الثنائية إلى توليد جهد خرج يتناسب مع كل عدد.

نختار قيم المقاومات الموزونة ثنائياً بحيث تكون R، R/2، R/4 وR/8 وذلك كي تكون قيم R_{in} متساوية التباعد (equally spaced). يمكن إيجاد كافة القيم الممكنة للمقاومة (R_{in}) باستخدام المعادلة:

$$R_{in} = D\frac{1}{R} + C\frac{1}{2R} + B\frac{1}{4R} + A\frac{1}{8R}$$

ولكن يجب استثناء القيم التي ليس لها مقابل رقمي في شيفرة الدخل التي تطبق على خطوط التحكم بالمفاتيح.

يمكن إيجاد جهد الخرج ببساطة باستخدام العلاقة $V_{out} = -V_{in}\frac{R_F}{R_{in}}$ وهي علاقة الربح للمضخم العاكس (راجع الفصل السابع)، ويبيِّن الشكل (6.H) جهود الخرج التي يتم الحصول عليها عندما يكون V_{in} = -5 V وR = 100 kΩ، وR_F = 20 kΩ وفي كافة الحالات المنطقية الممكنة للمداخل.



Truth Table

A	B	C	D	R_{in}	V_{out}
0	0	0	0	infinite	0V
0	0	0	1	100K	1V
0	0	1	0	50.0K	2V
0	0	1	1	33.3K	3V
0	1	0	0	25.0K	4V
0	1	0	1	20.0K	5V
0	1	1	0	16.6K	6V
0	1	1	1	14.3K	7V
1	0	0	0	12.5K	8V
1	0	0	1	11.1K	9V
1	0	1	0	10.0K	10V
1	0	1	1	9.1K	11V
1	1	0	0	8.3K	12V
1	1	0	1	7.7K	13V
1	1	1	0	7.1K	14V
1	1	1	1	6.7K	15V

الشكل (6.H): دارة مبدل DAC بسيطة بمقاومات موزونة ثنائياً.

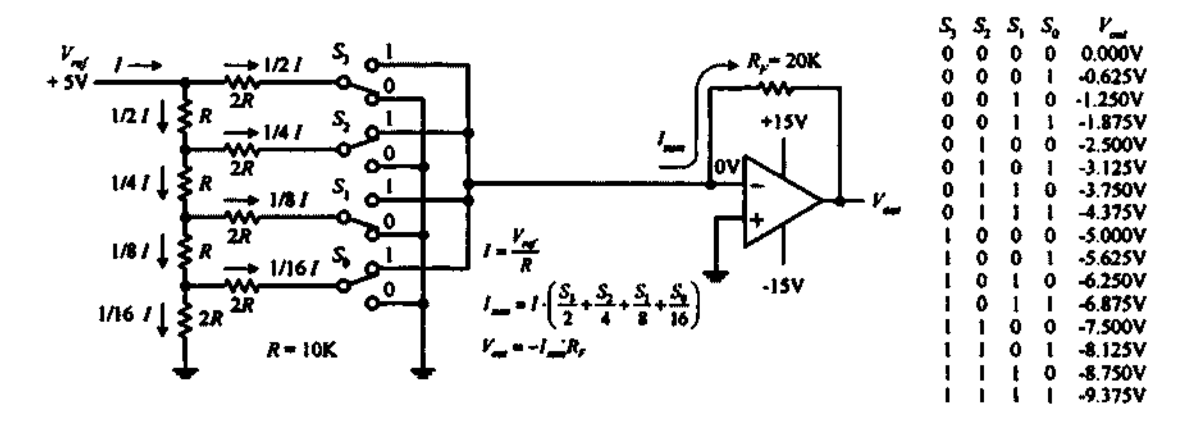
إن دقة هذا المبدل محدودة (4-bit، 16 مستوى للجهد التشابهي).

ومن أجل زيادة الدقة يمكن نظرياً التفكير بمبدل (8-bit) وفي هذه الحالة يتوجب استخدام دارة (74HC4066) إضافية ومقاومات R/16، R/32، R/64 وR/128، وهذا ممكن نظرياً، أما من الناحية العملية فهو غير ممكن لأننا لو اخترنا R = 100 kΩ فإننا سنحتاج لمقاومة R/128 = 0.78125 Ω ولو كان الحصول على مثل هذه المقاومة ممكناً، فإن دقة قيم المقاومات ستجعلنا نواجه مشكلة أخرى، لذلك تعتبر طريقة المقاومات الموزونة ثنائياً غير عملية عندما نحتاج إلى دقة تحويل عالية.

تستخدم شبكة مقاومات R، 2R بدلاً من المقاومات الموزونة ثنائياً لتلافي المشكلة السابقة وهذه الطريقة مستخدمة فعلياً في مبدلا DAC المتكاملة.

3.5.H مبدل رقمي تشابهي بسلم 2R-R

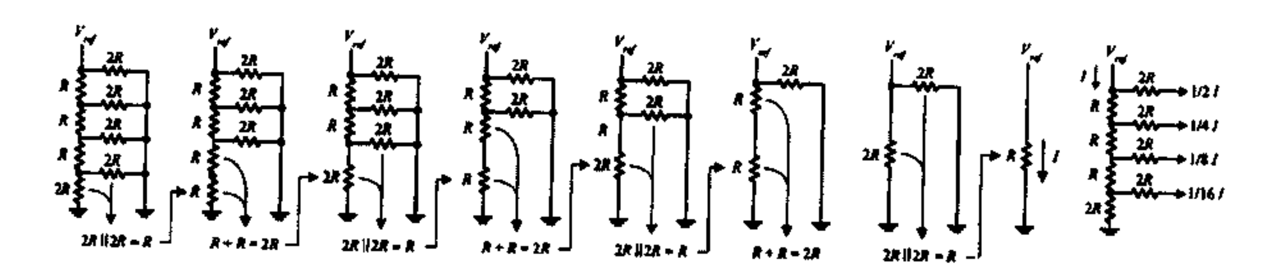
تستخدم في هذا المبدل شبكة مقاومات (R)، (2R) بدلاً من شبكة المقاومات الموزونة ثنائياً، والفائدة العملية تتلخص هنا في الحاجة إلى قيمتين للمقاومات (R) و(2R) ـــ تستخدم عملياً مقاومات كلها بنفس القيمة وللحصول مقاومة بقيمة تساوي R توصل مقاومتان متماثلتان (2R) على التوازي ـــ. يبيِّن الشكل (7.H) مبدل DAC بسيطاً (4-bit) باستخدام شبكة مقاومات (R)، (2R). افرض الآن أن المفاتيح متحكم بها رقميّاً (في المبدلات DACs العملية تستبدل المفاتيح بترانزستورات).



S_3	S_2	S_1	S_0	V_{out}
0	0	0	0	0.000V
0	0	0	1	-0.625V
0	0	1	0	-1.250V
0	0	1	1	-1.875V
0	1	0	0	-2.500V
0	1	0	1	-3.125V
0	1	1	0	-3.750V
0	1	1	1	-4.375V
1	0	0	0	-5.000V
1	0	0	1	-5.625V
1	0	1	0	-6.250V
1	0	1	1	-6.875V
1	1	0	0	-7.500V
1	1	0	1	-8.125V
1	1	1	0	-8.750V
1	1	1	1	-9.375V

الشكل (7.H): مبدل DAC، 4-bit بشبكة مقاومات 2R-R.

إن التيار الذي يمر في أي مفتاح دوماً ثابت بغض النظر عن وضعية المفتاح إذا كان للأعلى أو للأسفل، فعند وضع المفتاح على حالة (0)، أي إلى الأسفل يمر التيار عبر المفتاح إلى الأرض، وعند وضع المفتاح على حالة (1)، أي إلى الأعلى يمر التيار باتجاه الأرضي الافتراضي على المدخل العاكس للمضخم العملياتي (بما أن جهد المدخل غير العاكس للمضخم العملياتي يساوي الصفر وربح المضخم عالٍ جداً فإن جهد المدخلِ غير العاكس يساوي الصفر أيضاً، تذكر دارة المضخم العملياتي غير العاكس). وبما أن التيار الذي يمر في أي مفتاح دوماً ثابت، فإن التيار المستهلك من V_{ref} سيكون ثابتاً دوماً، واعتماداً على ذلك يمكن حساب التيارات التي تمر في فروع شبكة R-2R باستخدام قوانين تحليل الدارات. يبيِّن الشكل (7.H) أن تياراً يساوي $\left(\frac{1}{2}I\right)$ يمر عبر المفتاح S_3 (مفتاح خانة MSB)، وأن $\left(\frac{1}{4}I\right)$ يمر عبر S_2 و$\frac{1}{8}$ عبر S_1، و$\frac{1}{16}$ عبر S_0 (مفتاح خانة LSB)، وتبيِّن لك الدارات المعطاة في الشكل (8.H) كيفية حساب هذه التيارات.



الشكل (8.H): دارات مكافئة توضح كيفية حساب تيارات الفروع.

الآن وبعد أن أصبحت لدينا وسيلة لتوليد تيارات $I\frac{1}{2}$، $I\frac{1}{4}$، $I\frac{1}{8}$ و$I\frac{1}{16}$، يمكننا وبواسطة المفاتيح اختيار التيارات التي تجمع مع بعضها في المضخم، فإذا وضعت المفاتيح $S_3\ S_2\ S_1\ S_0$ على حالة 0101 المقابلة للرقم العشري (5) فإن $\left(I\frac{1}{4}\right)$ و$\left(I\frac{1}{16}\right)$ هي التي تشكل التيار (I_{sum})

$$I = \frac{V_{ref}}{R} = \frac{+5V}{10k\Omega} = 500\mu A$$

$$I_{sum} = \frac{1}{4}I + \frac{1}{16}I = \frac{1}{4}(500\mu A) + \frac{1}{16}(500\mu A) = 156.25\mu A$$

$$V_{out} = -I_{sum}.R_F = -(156.25\mu A)(20k\Omega) = -3.125V$$

يبيِّن الجدول المعطى في الشكل (7.H) قيم جهود الخرج عند كل الحالات الممكنة لوضعيات المفاتيح وتُعطى معادلة التيار I_{sum} العامة بالعلاقة:

$$I_{sum} = I\left(\frac{S_3}{2} + \frac{S_2}{4} + \frac{S_1}{8} + \frac{S_0}{16}\right)$$

أما جهد الخرج فيحسب من العلاقة:

$$V_{out} = -I_{sum}.R_F$$

يمكن زيادة عدد خانات كلمة الدخل بزيادة عدد المفاتيح وإضافة أذرع جديدة لشبكة المقاومات R-2R.

4.5.H المبدلات الرقمية التشابهية المتكاملة

يمكن من حيث المبدأ تكوين دارة مبدل رقمي تشابهي DAC من عناصر منفصلة مثل المقاومات والمفاتيح ومضخم العمليات، ولكن خطأ التبديل يكون عالياً بسبب أخطاء المقاومات، ولذلك يُفضل شراء مبدل DAC متكامل جاهز. تقوم عدة شركات بتصنيع مبدلات DAC متكاملة مثل شركة National Semiconductor، وشركة Analog Devices، وشركة Texas Instruments وغيرها، وتتوفر مبدلات DAC بـــ 6، 8، 10، 12، 16 و18-bits، وقد تكون دارة مبدل DAC المتكاملة ذات دخل رقمي تسلسلي، وليس تفرعي كما رأينا في الأشكال (6.H) و(7.H)، وقبل أن يعطي هذا المبدل خرجه التشابهي يجب إدخال الكلمة الرقمية كاملة إلى مسجل إزاحة داخلي. تحتاج أغلب دارات مبدلات DAC التكاملية إلى جهد مرجعي خارجي (external reference input) من أجل تحديد قيمة جهد الخرج، وهناك بعض مبدلات الـــ DAC ذات جهد مرجعي ثابت إلا أنها نادرة الاستخدام.

وغالباً ما تطرح الشركات الصانعة للمبدلات DAC أنواعا نسميها مبدلات DAC ضاربة (multiplying DACs) ومبدل الـــ DAC الضارب يمكنه إعطاء إشارة خرج تتناسب مع جداء الجهد المرجعي القابل للتغيير والكلمة الثنائية (أو الرقميَّة) التي تطبق على المداخل الرقميَّة للمبدل. يمكن استخدام المبدلات DAC غير المصممة كمبدلات ضاربة أيضاً كمبدلات ضاربة وذلك عن طريق استخدام الدخل المرجعي كدخل تشابهي، ولكن المبدل قد لا يعطي نفس مواصفات وجودة المبدل الضارب كمجال جهد الدخل الواسع وأزمنة التبديل السريعة وغيرها.

تستخدم المبدلات الضاربة في النظم التي تحوي مبدلات طاقة تعتمد مبدأ القياس النسبي مثل مقسمات الجهد الموضعية (تعطي جهداً يتعلق أو يتناسب مع الموضع)، أو حساسات الإجهاد أو حساسات الضغط. تحتاج هذه المبدلات إلى جهد تشابهي خارجي يعمل كمستوى معياري تستند إليه استجابة الخرج التشابهيَّة. إذا تغيَّر مستوى هذا الجهد المرجعي، بسبب قفزة جهد مثلاً، فإن استجابة مبدل الطاقة تتغير ويؤدي ذلك إلى خطأ في التبديل في خرج الـــ DAC. يمكن إلغاء هذا الخطأ باستخدام مبدل DAC ضارب عن طريق تطبيق الجهد المرجعي للحساس على الدخل التشابهي للمبدل فإذا حدث أي تغيُّر في هذا الجهد يقوم المبدِّل بتغيير خرجه بشكلٍ يتناسب مع تغير الجهد المرجعي.

يمكن للمبدل DAC أن يُعطي خرجاً تشابهياً أحادي القطبية (موجباً أو سالباً) أو ثنائي القطبيّة (موجباً وسالباً)، وفي أغلب الحالات وعند استخدام الـــ DAC في النمط أحادي القطبيّة يتم التعبير عن الشيفرة (الكود) الرقمية بالنظام الثنائي المعياري، أما عندما يعمل في النمط ثنائي القطبيّة فإن الشيفرة الرقمية المستخدمة غالباً ما تكون إما الترميز الثنائي المزاح (offset binary) أو المتمم الثنائي (2's complement)، لأن هذه الأنواع من الترميز الرقمي تجعل التعبير عن الأعداد الموجبة والسالبة ممكناً. يبين الشكل (9.H) الأنواع الثلاثة من الترميزات (الشيفرات) ومستويات جهود الخرج الموافقة لها. وفي الشكل تعبر FS (Full Scale) عن مستوى الجهد التشابهي الأعظمي الذي يمكن الحصول عليه في خرج المبدِّل عند تطبيق أعلى عدد ثنائي على الدخل، ومن الضروري جداً تحقيق خرج تشابهي لمبدل DAC ذي (n) خانة دخل رقميَّة مساوياً $(2^n - 1)/2^n \times V_{ref}$ وذلك عند تطبيق أعظم عدد رقمي على الدخل (أي في حالة FS) وليس $2^n/2^n \times V_{ref}$.

وكمثال، في مبدل 8-bit يكون عدد الأعداد الثنائية الممكنة $256 = 2^8$ ومستوى الخرج التشابهي الأعظمي $(255/256 \times V_{ref})$ وليس $256/256 \times V_{ref}$ لأن أعظم عدد ثنائي يُطبق على الدخل هو (1111 1111) ويساوي 255 بالنظام العشري والعدة المفقودة (missing count) تستخدم لخانة الـــ LSB (حالة الصفر).

Common digital codes used by digital-to-analog converters

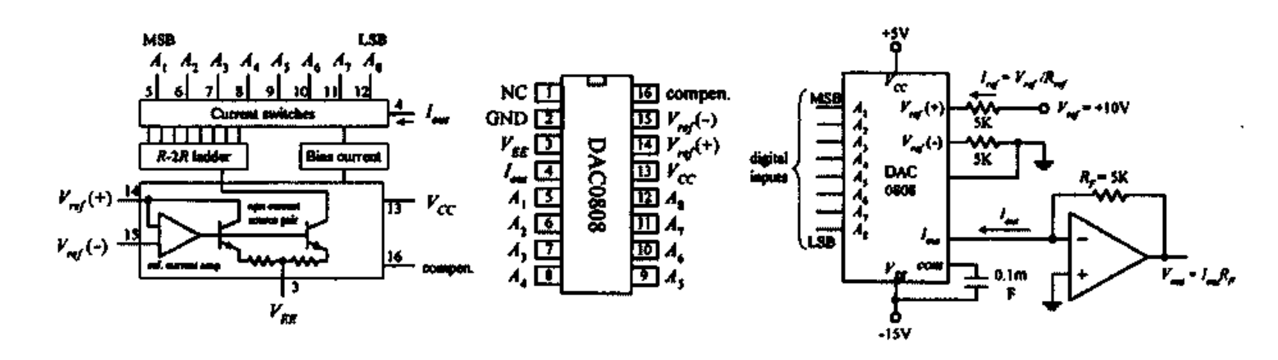
Unipolar operation			Bipolar operation					
	Binary	Analog output		Offset binary	Analog output		2's comp.	Analog output
FS	1111 1111	$V_{ref}\left(\frac{255}{256}\right)$	FS	1111 1111	$+V_{ref}\left(\frac{127}{128}\right)$	FS	0111 1111	$+V_{ref}\left(\frac{127}{128}\right)$
FS-1	1111 1110	$V_{ref}\left(\frac{254}{256}\right)$	FS-1	1111 1110	$+V_{ref}\left(\frac{126}{128}\right)$	FS-1	0111 1110	$+V_{ref}\left(\frac{126}{128}\right)$
	↓			↓			↓	
$\frac{FS}{2}$	1000 0000	$V_{ref}\left(\frac{128}{256}\right) = \frac{V_{ref}}{2}$	0 + 1LSB	1000 0001	$+V_{ref}\left(\frac{1}{128}\right)$	0 + 1LSB	0000 0001	$+V_{ref}\left(\frac{1}{128}\right)$
	↓		0	1000 0000	$V_{ref}\left(\frac{0}{128}\right) = 0$	0	0000 0000	$V_{ref}\left(\frac{0}{128}\right) = 0$
LSB	0000 0001	$V_{ref}\left(\frac{1}{256}\right)$	0-1LSB	0111 1111	$-V_{ref}\left(\frac{1}{128}\right)$	0-1LSB	1111 1111	$-V_{ref}\left(\frac{1}{128}\right)$
LSB-1	0000 0000	$V_{ref}\left(\frac{0}{256}\right) = 0$		↓			↓	
			-FS+1	0000 0001	$-V_{ref}\left(\frac{127}{128}\right)$	-FS+1	1000 0001	$-V_{ref}\left(\frac{127}{128}\right)$
	(FS = Full Scale)		-FS	0000 0000	$-V_{ref}\left(\frac{128}{128}\right)$	-FS	1000 0000	$-V_{ref}\left(\frac{128}{128}\right)$

الشكل (9.H): الشيفرات الرقمية العامة المستخدمة في المبدلات DACs.

5.5.H أمثلة عن دارات مبدلات DAC متكاملة

المبدل DAC 080 8-bit (National Semiconductor)

المبدل DAC0808 هو مبدل رقمي تشابهي 8-bit شائع الاستخدام، يحتاج هذا المبدل إلى تيار دخل مرجعي ويعطي (1) من (256) مستوى تيار خرج تشابهي. يبيِّن الشكل (10.H) المخطط الصندوقي لهذا المبدل، بالإضافة إلى شكل دارته المتكاملة ووظائف أرجل الدارة ونموذجاً لأحد التطبيقات.



الشكل (10.H): المبدّل الرقمي التشابهي DAC0808.

يتحدد مستوى الخرج التشابهي في دارة المثال التطبيقي المعطاة في الشكل بتطبيق تيار مرجعي (I_{ref}) على الرجل (14)، $+V_{ref}$، وفي الدارة تم ضبط هذا التيار على 2 mA باستخدام جهد $+V_{ref} = +10\ V$ ومقاومة R_{ref} تساوي 5 kΩ، كما تستخدم مقاومة أخرى 5 kΩ بين الرجل ($-V_{ref}$) والأرض. يتحدد تيار الخرج التشابهي في كافة الحالات الرقمية الممكنة للمداخل من العلاقة التالية:

$$I_{out} = I_{ref}\left(\frac{A_1}{2} + \frac{A_2}{4} + \ldots + \frac{A_8}{256}\right)$$

$$= \frac{\text{المكافئ العشري للدخل الرقمي}}{256}$$

وفي حالة القراءة العظمى تكون كافة المداخل الرقمية (1) والعدد الثنائي يكافئ 255 في النظام العشري وتيار الخرج التشابهي يساوي

$$I_{out} = \frac{255}{256} \times (2mA) = 1.99mA$$

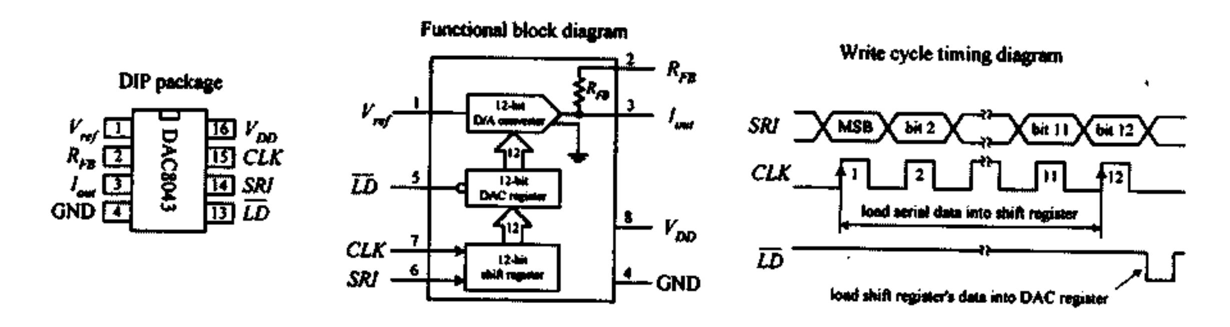
وباعتبار أن لخرج المبدل 256 مستوىً تشابهياً للتيار، فإن كل مستوىً من هذه المستويات يُزاح عن المستوى الذي يسبقه بمقدار (1.99 mA/256) أي بحوالي (0.0078 mA). يتم تحويل تيار الخرج إلى جهد باستخدام المضخم العملياتي، ووفقاً لقوانين تحليل دارات المضخمات العملياتية الواردة في الفصل السابع، فإن جهد الخرج يحسب من العلاقة ($V_{out} = I_{out}\ R_F$)، وفي حالة القراءة العظمى يكون جهد الخرج [V_{out} = (1.99 mA) (5 k) = 9.95 V].

والتباعد الجهدي بين مستويات الخرج التشابهية يساوي [9.95/256 = 0.0389 V].

يمكن توصيل المبدل DAC0808 كمبدل ضارب بتطبيق إشارة الدخل التشابهية على الدخل المرجعي ويجب أن يكون تيار الدخل التشابهي في هذه الحالة واقعاً ضمن المجال (16 µA وحتى 4 mA) للحصول على دقة معقولة، وينصح بالعودة إلى نشرة معطيات المبدِّل للاطلاع على مزيد من التفصيلات.

المبدل DAC8043، مبدل تسلسلي الدخل، 12 bit، ضارب

هذا المبدل من إنتاج شركة (Analog Devices)، وهو مبدل عالي الدقة ضارب بدخل رقمي تسلسلي 12-bit ومصنع بتقنية CMOS. يبيِّن الشكل (11.H) المخطط الصندوقي وشكل الدارة المتكاملة ووظائف أرجلها، إضافة إلى مخطط توقيت دورة الكتابة (Write Cycle).



الشكل (11.H): المبدّل DAC 8043.

تُطبق المعطيات التسلسلية على مسجل الدخل بمعدَّل تحدده نبضات clock حيث يتم تحميل bit واحد من معطيات الدخل مع كل جبهة صاعدة لنبضات clock، وحالما ينتهي تحميل معطيات الدخل فإن مسجل الدخل يُعطي هذه المعطيات إلى مسجل المبدِّل (DAC register) وذلك عن طريق تطبيق نبضة (Low) على المدخل $\overline{LD}$. تحوِّل المعطيات الموجودة في مسجل المبدل إلى تيار خرج ويؤخذ هذا التيار من الرجل (I_{out}).

ويحوَّل هذا التيار في أغلب التطبيقات إلى جهد باستخدام مضخم عملياتي، كما هي الحال في الدارات المعطاة في الشكل (12.H). في الدارة وحيدة القطبيَّة تستخدم شيفرة ثنائية معياريَّة لاختيار مستوى خرج تشاهي من (4096) حالة ممكنة لمستويات الخرج التشاهي، أما في الدارة ثنائية القطبيَّة فإن الشيفرة المستخدمة هي شيفرة الثنائي المزاح (offset binary code)، وهنا أيضاً يمكن اختيار حالة مستوى الخرج من 4096 حالة ممكنة، ولكن المجال يُقسَّم هنا بحيث يتم الحصول على قطبيات موجبة وسالبة. يمكن الاطلاع على نشرة معطيات هذا المبدل (DAC 8043 Data Sheet) من موقع شركة (Analog Devices) على الانترنيت.

6.H المبدلات التشابهية الرقميَّة

تستخدم عدة تقنيات لتحويل الإشارات التشابهية إلى إشارات رقمية، وأكثرها استخداماً تقنية التحويل باستخدام طريقة التقريب المتتالي وطريقة التبديل المرمَّز تفرعياً (parallel encoded conversion) والذي يسمى أيضاً flash conversion أي التبديل الومضي. أما الطرق الأخرى فهي عديدة ونذكر منها طرق تعديل رمز النبضة (Pulse Code Modulation) وطريقة التبديل نصف الومضي وطريقة دلتا في معالجة الإشارة delta signal processing (DSP). سوف نركز في هذه الفقرة على طريقة التقريب المتتالي وطريق التبديل المرمَّز تفرعياً.

1.6.H التقريب المتتالي

إن طريقة التقريب المتتالي هي أكثر الطرق استخداماً في مبدلات ADCs التكاملية، وفي هذه الطريقة يتم تحديد كل خانة من خانات الخرج الرقمي بدءاً من خانة الـ MSB وحتى خانة الـ LSB ويتم ذلك بتحديد خانة الـ MSB وعند الانتهاء منها يتم التعامل مع الخانة التي تسبقها (one bit at a time)، ويتم ذلك بأزمنة تبديل سريعة تتراوح بين (10) و(300 µs) وبعدد محدود من الدارات. يبيِّن الشكل (13.H) مبدِّل تقريب متتالٍ 8-bit بسيطاً مع مثال يبيِّن تتالي تحويل إشارة تشابهية إلى رقميَّة.

Unipolar Operation (2-Quadrant)

V_{ref} +10V, +5V, Serial data input, Clock, $\overline{LD}$, DAC8043, V_{ref}, V_{DD}, R_{FB}, SRI, CLK, I_{out}, $\overline{LD}$, GND, 10pF, +15V, -15V, V_{out}

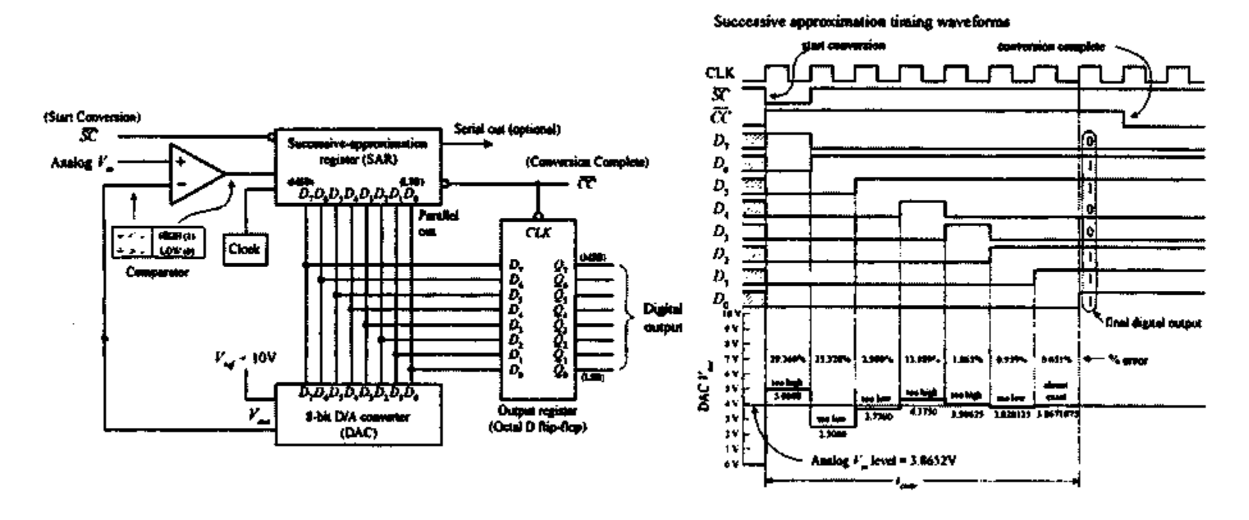
Digital input (binary)	Nominal analog output
1111 1111 1111	$-V_{ref}\left(\frac{4095}{4096}\right)$
1000 0000 0001	$-V_{ref}\left(\frac{2049}{4096}\right)$
1000 0000 0000	$-V_{ref}\left(\frac{2048}{4096}\right)=-\frac{V_{ref}}{2}$
0111 1111 1111	$-V_{ref}\left(\frac{2047}{4096}\right)$
0000 0000 0001	$-V_{ref}\left(\frac{1}{4096}\right)$

Bipolar Operation (4-Quadrant)

V_{in}, 100Ω, +5V, 20K, Serial data input, Clock, $\overline{LD}$, DAC8043, V_{ref}, V_{DD}, R_{FB}, 50Ω, 10pF, SRI, CLK, I_{out}, GND, 20K, 10K, V_{out}

Digital input (offset binary)	Nominal analog output
1111 1111 1111	$+V_{ref}\left(\frac{2047}{2048}\right)$
1000 0000 0001	$+V_{ref}\left(\frac{1}{2048}\right)$
1000 0000 0000	
0111 1111 1111	$-V_{ref}\left(\frac{1}{2048}\right)$
0000 0000 0001	$-V_{ref}\left(\frac{2047}{2048}\right)$
0000 0000 0000	$-V_{ref}\left(\frac{2048}{2048}\right)$

الشكل (12.H): دارات مبدّل DAC8043، في الاعلى دارة أحادية القطبيّة مع جدول بالتشكيلات الرقمية للدخل وجهود الخرج التشابهية، وفي الأسفل دارة ثنائية القطبيّة مع جهود الخرج الموافقة لتشكيلات رقمية معينة في الدخل.



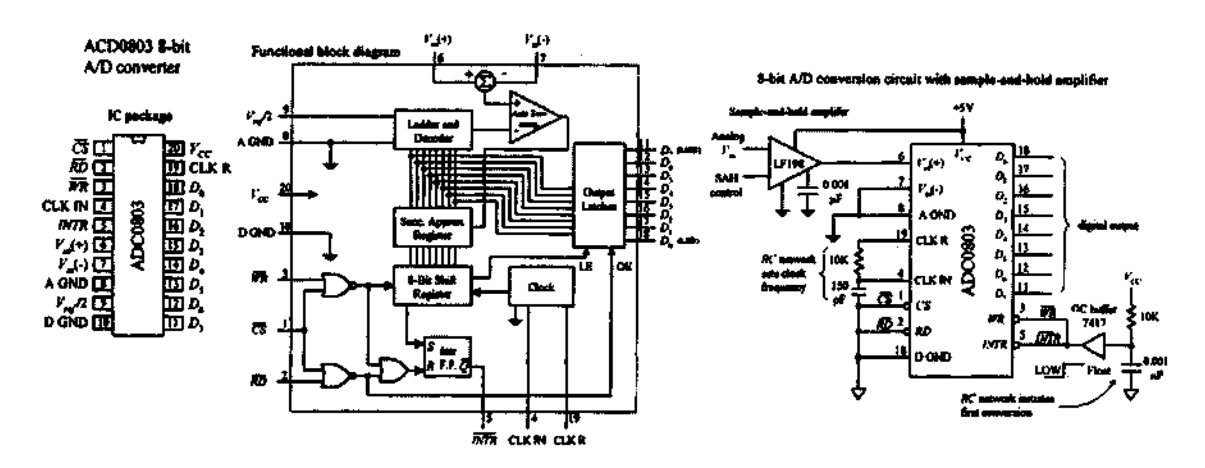
الشكل (13.H): مخطط صندوقي لمبدّل ADC يعمل وفق مبدأ التقريب المتتالي.

تبدأ عملية التبديل بتطبيق نبضة Low على مدخل $\overline{SC}$ (Start Conversion) وعندها يُطبق مسجل التقريب المتتالي Successive Approximation Register (SAR) حالة high على خانة MSB (D_7) للمبدل DAC، وبما أن D_7 فقط في حالة high فإن خرج المبدل DAC يكون مساوياً نصف مستوى القراءة العظمى وتساوي هنا (+5 V) لأن القراءة العظمى هي (+10 V). تقارن الـ (+5 V) مع إشارة الدخل بواسطة مقارن (Comparator) فإذا كانت إشارة الدخل أكبر من (+5 V) فإن (SAR) يبقي D_7 في حالة high وإلا فإنه يعيدها إلى حالة Low، ومع نبضة clock التالية تعالج الخانة التالية وهي (D_6) فتوضع مؤقتاً على حالة (high) ويقارن خرج الـ DAC التشابهي مع الإشارة المطبقة على الدخل فإذا كانت إشارة الدخل أكبر تبقى الخانة (D_6) في حالة high وإلا فإنها تعاد إلى حالة Low، ويتكرر هذا العمل حتى الانتهاء من خانة الـ LSB، وعند الانتهاء من عملية التحويل فإن الخرج ($\overline{CC}$) الذي يعني أن عملية التحويل قد انتهت (Conversion Complete)، وهو خرج مسجل التقريب المتتالي، ينتقل إلى حالة Low مبيناً انتهاء عملية تبديل الخانات الثمانية وأن المعطيات الثمانية الثنائية جاهزة للتطبيق على القلاب الثماني (octal Flip-Flop) حيث تظهر على مخارجه Q_0 وحتى Q_7. يبيِّن مخطط التوقيت (timing diagram) تحويل جهد تشابهي 3.8625 V إلى مكافئه الرقمي التقريبي. في عملية التقريب المتتالي وبعد وضع قيمة خانة (D_7) تكون نسبة الخطأ بين المستوى التشابهي للإشارة والمستوى الرقمي المكافئ % 29.360 ولكن بعد الانتهاء من عملية التحويل تنخفض النسبة إلى 0.051%. افترضنا حتى الآن أن مستوى الإشارة التشابهية ثابت خلال عملية التبديل ولكن ما الذي يجري إذا كانت إشارة الدخل التشابهية متغيرة مع الزمن؟ والجواب هو أن نسبة الخطأ سوف تزداد وكلما كانت سرعة تغير الإشارة التشابهية أكبر كلما زاد الخطأ أكثر. تستخدم دارة أخذ عينة ومسكها (Sample and hold Circuit) وتوصل هذه الدارة مع مدخل الإشارة التشابهية وتقوم هذه الدارة بأخذ عينة من إشارة الدخل وتحتفظ بها في فترة قيام المبدل ADC بعملية التبديل. تحوي أغلب مبدلات ADC التكاملية دارة Sample and hold داخلية، أما في الأنواع غير المتكاملة من المبدلات فتوصل دارة أخذ ومسك عينة خارجية مع المبدل، وكمثال على ذلك المضخم LF198 الذي يعمل كمضخم آخذ لعينة ويمسك هذه العينة وسوف نتعرف أكثر وبتفصيل أكبر على المضخم LF198.

2.6.H أمثلة عن المبدلات التشابهية الرقمية

المبدل ADC0803، مبدل 8-bit من إنتاج شركة National Semiconductor

المبدل ADC0803 هو عبارة عن مبدل تشابهي رقمي متكامل 8-bit يعمل وفق مبدأ التقريب المتتالي ويحوي على دارة Clock داخلية. يُبيِّن الشكل (14.H) شكل الدارة التكاملية للمبدِّل ووظائف الأرجل، والمخطط الصندوقي، ودارة توضح توصيلة المبدِّل كمثال عملي.



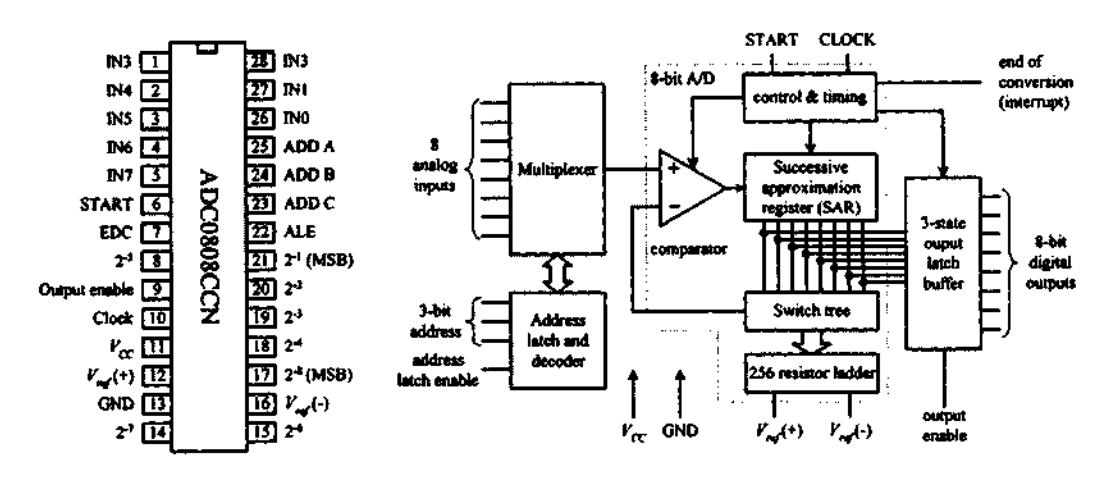
الشكل (14.H): المبدِّل التشابهي الرقمي 0803.

تبدأ عملية التحويل بتطبيق نبضة Low على الدخل $\overline{WR}$ وعند انتهاء عملية التحويل ينتقل الخرج $\overline{INTR}$ إلى حالة Low. وعندما يوصل الخرج $\overline{INTR}$ مباشرة مع $\overline{WR}$ يوضع المبدل في نمط عمل التبديل الدائم. تستخدم دارة المقاومة 10 kΩ، والمكثف 0.001 µF والعازل buffer لضمان تطبيق Low على الدخل $\overline{WR}$ عند تطبيق تغذية على الدارة، أما المقاومة والمكثف الموصولان مع المداخل CLK-R وCLK-IN فإنهما يعملان على تأمين تردد نبضات Clock، ويُعطى تردد نبضات clock بالعلاقة $f = \frac{1}{1.RC}$.

للمبدل DAC0803 مدخل للجهود التشابهية الموجبة (الرجل 6) ومدخل للجهود التشابهية السالبة (الرجل 7)، ووجود دخلين للمبدِّل يسمح بتطبيق إشارات موجبة أو سالبة أو إشارات دخل تفاضلية. عند تطبيق إشارة دخل موجبة فقط علىٍ المبدل توصل الرجل (7) إلى الأرض وتعمل الرجل (6) في هذه الحالة كطرف دخل، وإذا كانت إشارة الدخل سالبة دوما، فإنها تطبق على الرجل (7) وتؤرض الرجل (6)، أما الإشارات ذات القطبيات الموجبة والسالبة فإنها تطبق بين الأرجل (6) و(7). يحدِّد المدخل ($V_{ref}/2$) جهد الدخل التشابهي الذي يولد الخرج الرقمي الأعظمي (1111 1111) المكافئ لـــ (255 عشري). إذا ترك هذا المدخل بدون وصل فإن الجهد 5 V + هو الذي يحدِّد مجال الدخل التشابهي بين (0) و(5 V)، وعند تطبيق جهد على المدخل ($V_{ref}/2$) يمكن تغيير مجال جهد الدخل التشابهي، وكمثال على ذلك إذا كان مجال جهد الدخل المطلوب بين (0) والـــ (4 V +)، فإن (4 V +) هي التي ستولد أعظم خرج رقمي (1111 1111) وفي هذه الحالة يُطبق على المدخل ($V_{ref}/2$) جهد يساوي (2 V +). يستخدم مضخم LF198 في دارة المثال العملي ويعمل هذا المضخم على منع حدوث أخطاء في عملية التبديل بسبب تغيرات الإشارة وتحوي الدارة LF198 على مضخمين غير عاكسين ربح كل منهما يساوي الواحد ومفتاح منطقي متحكم به ومكثف خارجي. عندما يصبح مدخل تحكم LF198 في حالة high يُغلق المفتاح المنطقي الداخلي ويُشحن المكثف الخارجي بسرعة إلى جهد يساوي جهد الدخل في تلك اللحظة، وعندما يصبح جهد مدخل التحكم Low يحتفظ المكثف بجهد يساوي جهد الدخل. يستخدم الجهد المخزون في المكثف من قبل المبدل ADC دون أن يكون لتغيرات إشارة الدخل تأثير على نتيجة التبديل. وكما ذكرنا سابقاً توجد أنواع عديدة من مبدلات ADC التي تحوي دارة أخذ عينة والاحتفاظ بها ضمن غلاف الدارة المتكاملة، ويمكن التعرف على هذه المبدلات من الكتالوكات الإلكترونية.

المبدل ADC0808، مبدل تشابهي رقمي 8-bit مع ناخب ثمانية أقنية وخرج تفرعي (من إنتاج شركة National Semiconductor)

المبدل ADC0808 مشابه للمبدِّل السابق (0803) ولكنه مزوَّد بناخب لثمانية مداخل ومن أجل عنونة واحدة من قنوات الدخل تُطبق كلمة رقمية (3-bit) على مداخل العنونة (ADD A، ADD B، ADD C).



الشكل (15.H): مبدل التقريب المتتالي (0808).

تستخدم مبدلات ADCs المزودة بناخب في نظم تحصيل المعطيات التي تراقب عدداً من مبدلات الطاقة المختلفة (input transducers)، يستخدم في هذه النظم معالج صغري (microprocessor) أو متحكم صغري (microcontroller) لتوليد إشارة (كلمة) العنونة ولمعالجة الخرج الرقمي للمبدل ADC ولتوليد القرارات المنطقية المناسبة اعتماداً على المعطيات التي يتم الحصول عليها من خرج المبدل.

المبدل AD0831، مبدل 8-bit بخرج تسلسلي (من إنتاج شركة National Semiconductor)

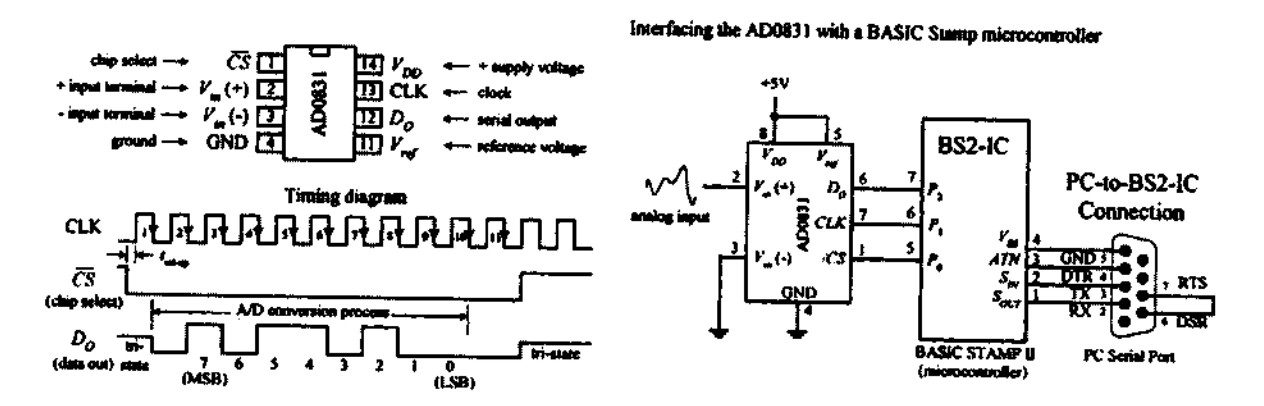
هذا المبدِّل AD0831 هو أيضاً مبدل 8-bit وله خرج تسلسلي متزامن (D_0)، انظر الشكل (16.H). يستفاد من المبدلات ADCs تسلسلية الخرج في تطبيقات المتحكمات المنطقية التي تكون فيها خطوط الدخل/خرج (I/O) محدودة.

سنتعرف على مثال عن استخدام المبدل AD0831 مع المتحكم الصغري BASIC Stamp II (BS2)، وهو عبارة عن متحكم مزوَّد بمفسر PBASIC (PBASIC interpreter)، وسوف نناقش هذا النوع من المتحكمات لاحقاً.

ويكفي الآن أن نعرف أن لهذا المتحكم عدداً من أطراف الدخل/خرج (I/O) التي يمكن برمجتها عبر برنامج حاسوبي PC Program كي يقبل إشارات خرج المبدِّل.

يُستخدم الوصل من PC إلى BS2 عن طريق المنفذ التسلسلي للحاسوب عند برمجة الـ BS2. تبدأ عملية التحويل في المبدل (AD8031) بتطبيق إشارة high-to-low من الخرج P_0 للمتحكم (BS2) ويجب أن تبقى هذه الإشارة في حالة Low طيلة فترة التبديل، وفي الخطوة التالية يجب أن تُطبق على مدخل CLK للمبدل AD0831 نبضة Clock واحدة (والنبضة الوحيدة تمثل بالانتقالات Low-to-high-to Low) من الخرج P_2 للمتحكم BS2 كي يبدأ التحويل مع نبضة Clock التالية. تطبق على المبدل بعد نبضة Clock الأولى ثماني نبضات Clock من قِبل (BS2) لإكمال عملية التبديل.

وخلال كل نبضة تُرسل خانة تسلسليَّة عبر الـ D_0 وتدخل إلى المدخل (P_3) للمتحكم (BS2).



الشكل (16.H): دارة المبدل AD0831 ومثال تطبيقي.

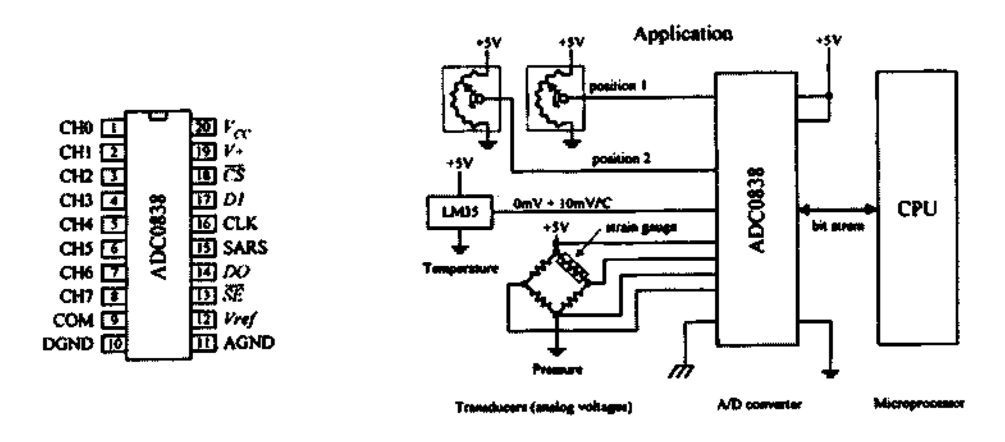
توصل أطراف الجهد المرجعي و(V-) في الشكل (16.H) لتأمين مجال جهد دخل من (0) وحتى (+5 V) حيث يقابل الجهد التشابهي (0) القراءة الرقميّة (0000 0000) والقراءة المنطقية (1111 1111) تقابل الجهد (+5 V).

إذا كان جهد الدخل التشابهي (3.53 V)، فإن الخرج التسلسلي الرقمي سيكون (10110100).

المبدل AD0838، مبدل 8-bit بدخل تسلسلي وناخب من إنتاج شركة (National Semiconductor)

هذا المبدل مشابه للمبدل السابق AD0831 ولكنه مزود بناخب لثماني أقنية.

وكي يختار المبدل إحدى قنوات الدخل نحتاج لخانات عنونة حيث يُطبق العنوان (كلمة العنوان) على مداخل العنونة قبل البدء بعملية التحويل. يمكن الحصول على التفصيلات الكاملة عن المبدل AD0838 من نشرة معطياته.

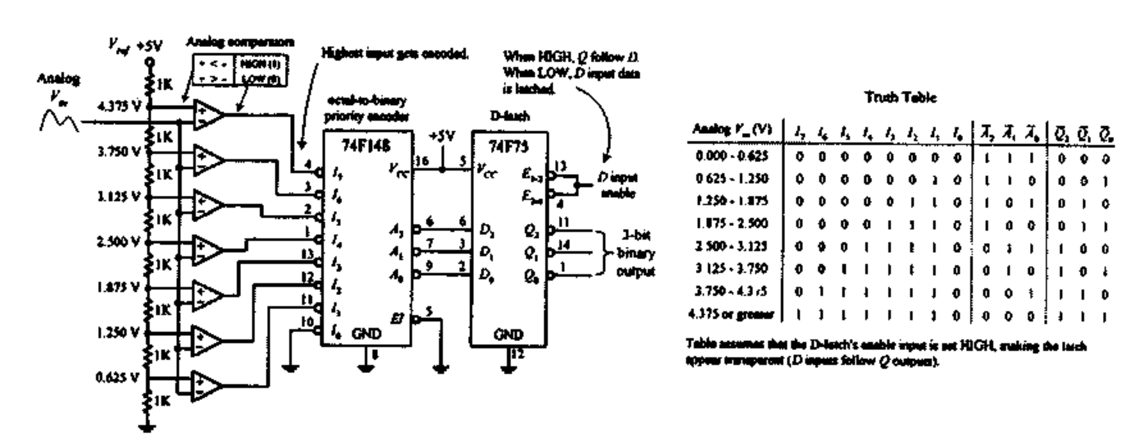


الشكل (17.H): المبدّل ADC0838.

3.6.H التحويل التشابهي الرقمي المرمّز تفرعياً (تحويل ومضي)

ربما يكون التبديل التشابهي الرقمي A/D التفرعي (التبديل الومضي) هو أسهل أنواع التبديل من ناحية فهمه، ويسمى هذا النوع من التبديل أيضاً باسم التبديل متعدد المقارنات وتحدث عملية التبديل في لحظة واحدة ومن هنا جاءت تسمية هذه المبدلات أيضاً بالمبدلات الومضية (Flash Converters).

يبيِّن الشكل (18.H) مبدلاً تفرعياً يعطي في خرجه (3-bit).



Analog V_{in} (V)	I_7	I_6	I_5	I_4	I_3	I_2	I_1	I_0	$\overline{A}_2$	$\overline{A}_1$	$\overline{A}_0$	$\overline{Q}_2$	$\overline{Q}_1$	$\overline{Q}_0$
0.000 - 0.625	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
0.625 - 1.250	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1
1.250 - 1.875	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
1.875 - 2.500	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1
2.500 - 3.125	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
3.125 - 3.750	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1
3.750 - 4.375	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0
4.375 or greater	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1

Table assumes that the D-latch's enable input is set HIGH, making the latch appear transparent (D inputs follow Q outputs).

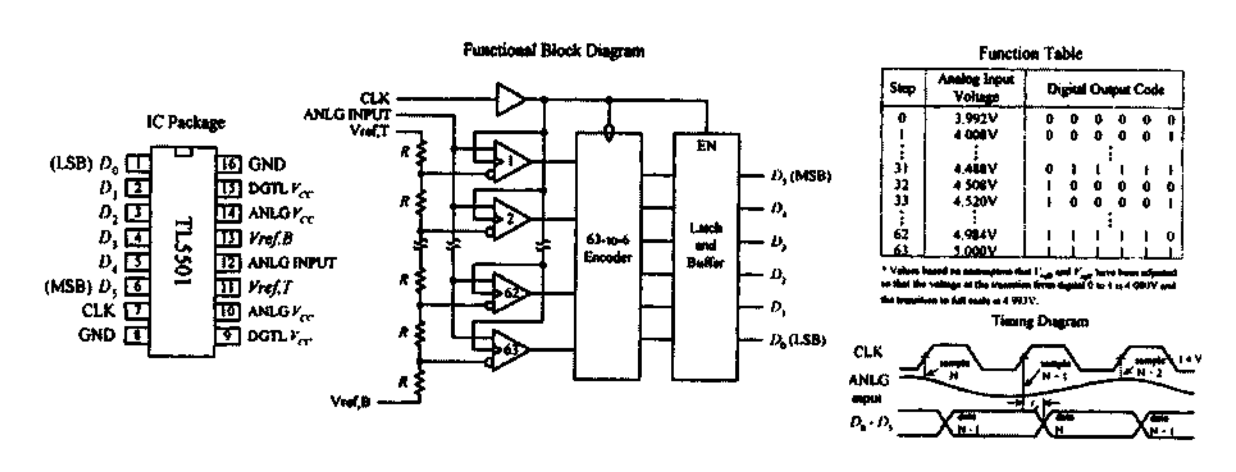
الشكل (18.H): مبدل تفرعي AD بثلاث خانات خرج.

تشكل المقارنات أساس عمل هذا النوع من المبدلات ويُطبق على كل مقارن جهد مرجعي مختلف عن المقارنات الأخرى، ويتم تأمين الجهود المرجعيَّة للمقارنات بواسطة شبكة مقسم جهد مكونة من ثماني مقاومات بقيمة (1 kΩ). الجهد المرجعي المستخدم هو (+5 V) ولذلك يكون هبوط الجهد على كل مقاومة (0.625 V) ويمكن تحديد الجهد المرجعي المطبق على

كل مقارن. تُطبق الإشارة التشابهيَّة في نفس الوقت على كل المقارنات عبر الخط المشترك الموصول مع المداخل العاكسة لكافة المقارنات. إذا كان جهد الدخل بين (2.5 V) و(3.125 V)، فإن المقارنات التي جهدها المرجعي أخفض من (3.125 V) فقط تعطى حالة (high) في الخرج. يستخدم مرمز (octal -to- binary priority encoder) من ثماني إلى ثلاث خانات من أجل الحصول على ثلاث خانات في الخرج وتُطبق مخارج المقارنات الثمانية على مداخل المرمِّز (74F148). يُضاف إلى الدارة الكلية دارة متكاملة لمواسك من نوع D (D-Latch) ويسمح ذلك بتأمين تحكم بالتمكين (enable-control) للخرج الثنائي، ويوضح جدول الحقيقة آلية العمل.

المبدل TLC5501، مبدل تفرعي 6-bit متكامل (من إنتاج شركة Texas Instruments)

المبدل (TLC5501) هو مبدِّل تشابهي رقمي ADC متكامل ودارته تشبه الدارة المبينة في الشكل (18.H) ولكن خرجه 6-bit ولهذا المبدل جهدا تغذية مستمرة أحدهما لتغذية الدارات الرقمية الداخلية، والآخر لتغذية الدارات التشابهية الداخلية ومجال هذين الجهدين من (-0.5 V) وحتى (+7 V) أما مجال جهد الدخل التشابهي فيتحدد من (-0.5 V) وحتى (+Vcc +0.5 V). تستخدم طرفيتان مرجعيتان (V_{ref}, T) و(V_{ref}, B) لتحديد مجال العمل التشابهي ويستخدم مدخل تمكين Clock للتحكم بأخذ العينات التشابهيَّة (انظر مخطط التوقيت). يبيِّن جدول الحقيقة في الشكل (19.H) كافة المخارج الرقمية الممكنة عند ضبط (V_{ref}, T) و(V_{ref}, B) بحيث يكون الجهد عند الانتقال من (0) رقمي إلى (1) رقمي مساوياً (4 V) وللانتقال إلى القراءة العظمى هو (4.993 V). يمكن تغيير هذا المجال بتغيير الجهود المرجعية. للاطلاع على مزيد من التفصيلات يُنصح بالعودة إلى نشرة المعطيات.



Step	Analog Input Voltage	Digital Output Code					
0	3.992V	0	0	0	0	0	0
1	4.008V	0	0	0	0	0	1
⋮	⋮			⋮			
31	4.488V	0	1	1	1	1	1
32	4.508V	1	0	0	0	0	0
33	4.520V	1	0	0	0	0	1
⋮	⋮			⋮			
62	4.984V	1	1	1	1	1	0
63	5.000V	1	1	1	1	1	1

الشكل (19.H): المبدل ADCTL5501.

تعتبر مبدلات ADC التفرعية أسرع أنواع المبدلات ADC على الإطلاق وبنبضة Clock واحدة يمكن معرفة القيمة الرقمية الموافقة لإشارة الدخل وسلبيَّة هذا النوع من المبدلات هو حاجتها لعدد كبير من المقارنات، فمن أجل الحصول على 8-bit في الخرج نحتاج إلى (256) مقارن وللحصول على (10) خانات خرج نحتاج إلى (1024) مقارن ولكي تعمل هذه المقارنات بسرعة فإنها تستهلك تياراً عالياً، وعند الرغبة في الحصول على أكثر من (10) خانات في الخرج يُصبح عدد المقارنات اللازم عالياً جداً. يتراوح زمن التحويل في هذه المبدلات بين (10 ns) و(50 ns) وتستخدم في نظم تحصيل المعطيات ذات السرعات العالية كما هي الحال في تحويل إشارات الفيديو التلفزيونية إلى إشارات رقميَّة، وفي التحليل الراداري (radar analysis)، وفي رواسم الإشارة الرقمية عالية السرعة، وفي تطبيقات الرؤية في الإنسان الآلي (robot vision applications)، وغيرها.



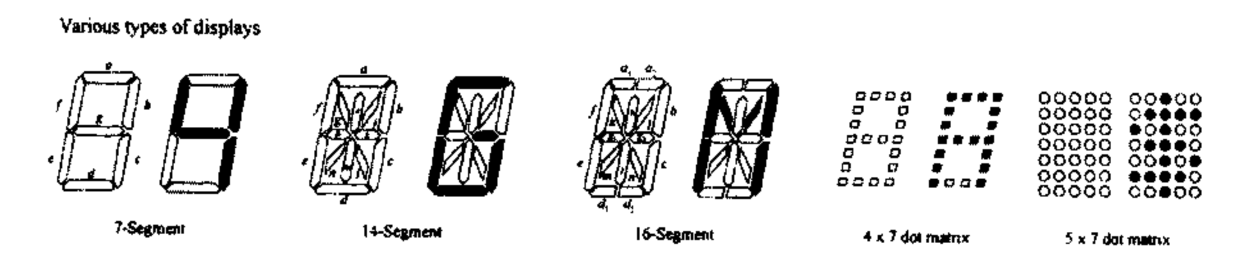
وحدات الإظهار

تستخدم أنواع عديدة من وحدات الإظهار مع الدارات المنطقية لإظهار الأعداد (numbers)، والحروف (Letters)، والمحارف الخاصة (special characters) وحتى الرسومات والأشكال.

سندرس في هذا الملحق نوعين فقط من وحدات الإظهار وهي وحدات الإظهار التي تستخدم الديودات المصدرة للضوء (LEDs) ووحدات الإظهار بالكريستال السائل Liquid-Crystal Display (LCD).

1.I وحدات الإظهار التي تعمل على ديودات مصدرة للضوء

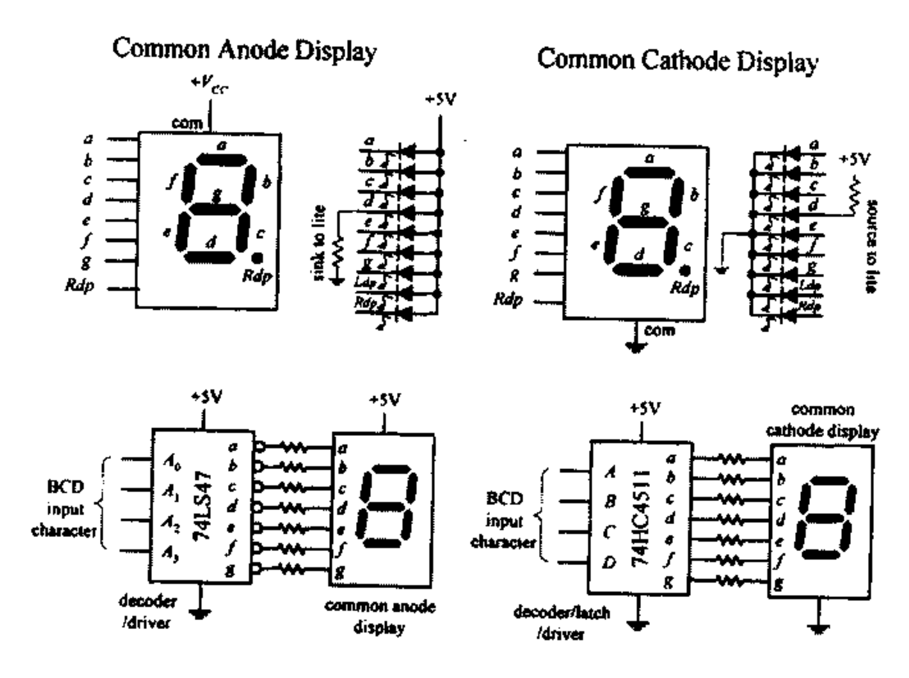
تتوفر وحدات الإظهار هذه بثلاثة أنواع رئيسيَّة هي وحدات الإظهار العددي (numbers)، ووحدات الإظهار الأبجدي العددي (alphanumberic) ومصفوفات النقاط (dot matrix)، انظر الشكل (1.I). تتكون وحدات الإظهار العددي من سبعة قطاعات يتكون كل قطاع فيها من LED، ويُعطى لكل LED ترميز حرفي، كما في الشكل. تستخدم وحدات الإظهار سباعية القطع (7-segment LED) لإظهار الأرقام من (0) وحتى (9)، كما يمكن أيضاً استخدامها لإظهار الأرقام في النظام الستة عشري hexadecimal (من 0 إلى 9 وA، B، C، D، E، F)، أما وحدات الإظهار ذات 14 قطعة أو 16 قطعة ومصفوفات النقاط (7 × 4) الخاصة فهي وحدات إظهار حرفي (للأحرف) رقمي. يمكن استخدام مصفوفات النقاط (7 × 5) لإظهار الأحرف والأرقام والأشكال ـــ حيث يمكن إظهار محارف خاصة (فريدة) ـــ (unique characters) ـــ وأشكال بسيطة.



الشكل (1.I): نماذج مختلفة من وحدات الإظهار.

1.1.I القيادة المباشرة لوحدات الإظهار العدديّة

تتوفر وحدات الإظهار سباعية القطع بنوعين، مصعد مشترك (Common anode) ومهبط مشترك (Common cathode)، ويبيِّن الشكل (2.I) وحدة إظهار رقمية ثمانية القطع (7 قطاعات رقميّة، ونقطة للفاصلة العشريَّة) من نوع المصعد المشترك وأخرى من نوع المهبط المشترك.



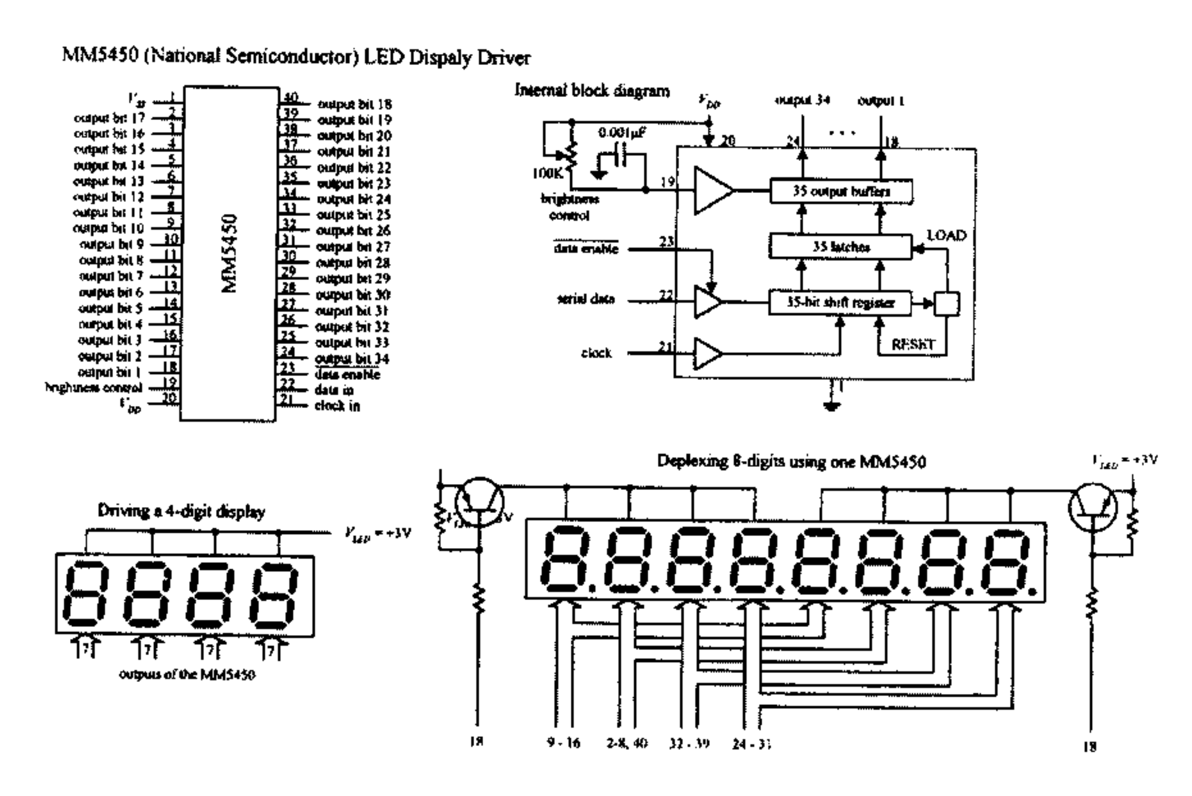
الشكل (2.I): وحدات إظهار سباعية القطع من نوع مصعد مشترك ومهبط مشترك.

في وحدات الإظهار سباعية القطع من نوع المهبط المشترك تكون مهابط كافة الديودات LEDs موصولة مع بعضها ومؤرضة ويقاد كل مقطع بتطبيق جهد (5 V) عبر مقاومة على مصعد ديود ذلك القطاع، أما في نوع المصعد المشترك فتكون كافة مصاعد الديودات موصولة مع بعضها إلى جهد (+5 V) ويقاد ديود كل قطاع بوصله إلى الأرض بواسطة مقاومة مناسبة. تستخدم عادة دارة متكاملة تسمى كاشفاً من BCD إلى إظهار سباعي القطع (BCD -to- 7 segment decoder/driver) لقيادة وحدات الإظهار سباعية القطع كما في الشكل (2.I) يُطبق الدخل بنظام BCD على دخل الكاشف فيظهر الرقم العشري المكافئ على وحدة الإظهار، فمثلاً عند تطبيق (1001) على المداخل A_3 - A_0 يظهر على وحدة الإظهار الرقم (5). يعتبر الكاشف 74L547 ذو المخارج الفعالة بحالة Low مناسباً لقيادة وحدات إظهار من نوع المصعد المشترك أما الكاشف 74HC4511 ذو المخارج الفعالة بحالة (high) فهو مناسب لقيادة وحدات الإظهار سباعية القطع من نوع المهبط المشترك.

للدارتين المتكاملتين المذكورتين أطراف إضافية من أجل التحكم بالنقطة العشرية (decimal point) ولحجب التموجات (ripple blanking) وللاختبار (Lamp testing)، وقد درسنا استخدامات الأطراف الإضافية في الفقرة 6.12. عند استخدام وحدة إظهار لثمانية أرقام (8-digit) تصبح تقنية الوصل السابقة مكلفة لأنها تحتاج إلى ثمانية كواشف (8 دارات متكاملة تعمل ككواشف BCD -to- 7 segment decoders) ويستعاض عن طريقة القيادة السابقة باستخدام دارة متكاملة خاصة للقيادة المباشرة لوحدات الإظهار التي تعمل على LEDs (Special direct-drive LED display driver IC)، فعلى سبيل المثال تتوفر الدارة المتكاملة MM5450 من (National Semiconductor) — وهذه الدارة مبينة في الشكل (3.I) — وهذه الدارة مصممة لقيادة وحدات إظهار ديودية LEDs لأربعة أعداد أو خمسة (4 -or 5 digit) من النوع الحرفي العددي

(alphanumeric) ذي المصعد المشترك. لهذه الدارات (34) خرج متآلف مع TTL وتستخدم هذه المخارج لقيادة قطاعات الإظهار الديودية (LEd segments) في وحدة الإظهار. يستطيع كل واحد من هذه المخارج امتصاص تيار حتى (15 mA) ولتحديد خطوط الخرج التي تقاد إلى حالة high أو Low، تُطبق معطيات الدخل التسلسلي على الدخل التسلسلي للدارة MM5450 وطول سلسلة معطيات الدخل التي يتم إدخالها (36-bit)، الخانة الأولى هي خانة بَدء (start-bit) وتوضع دوماً (1)، أما الخانات الـ (35) الباقية فهي خانات معطيات.

وتتعلق كل خانة بخط خرج معطيات مستخدم لقيادة أحد قطاعات الإظهار في وحدات الإظهار. ومع نبضة Clock السادسة والثلاثين تُولد إشارة LOAD (تحميل) تحمِّل خانات المعطيات الـ (35) إلى مواسك (Latches) — انظر المخطط الصندوقي في الشكل (3.I) — ومع حالة Low لنبضة Clock تولد إشارة $\overline{RESET}$ تصفر عداد الإزاحة من أجل مجموعة المعطيات التالية. يمكن التعرف على مزيد من المعلومات عن الدارة MM5450 من موقع الإنترنيت لشركة National Semiconductor، (www.national.com).



الشكل (3.I): الدارة المتكاملة MM5450 لقيادة الإظهار.

2.1.I وحدات الإظهار الديودي المنتخب

تستخدم تقنية أخرى لقيادة الإظهار متعدد الأرقام باستخدام مبدأ الانتخاب (multiplexing)، وتوفر هذه التقنية كثيراً في عدد الوصلات اللازمة بين وحدة الإظهار ودارات القيادة المنطقية.

تتشارك كافة الأرقام (digits) على خطوط القطاعات المشتركة (common segment lines)، ويُضاء رقم واحد (one digit) في وحدة الإظهار خلال لحظة معينة، ولكي نجعل وحدة الإظهار تبدو وكأنها مضاءة طوال الوقت فإن كافة الأرقام يجب إنعاش أضاءتها (أو تكرار إضاءتها) بسرعة عالية وبالتتابع مراراً وتكراراً، ويبيِّن الشكل (4.I) كيفية عمل قيادة الإظهار الانتخابي.

Simple multiplexing scheme

الشكل (4.I): دارة عملية لقيادة الإظهار بالطريقة الانتخابيّة.

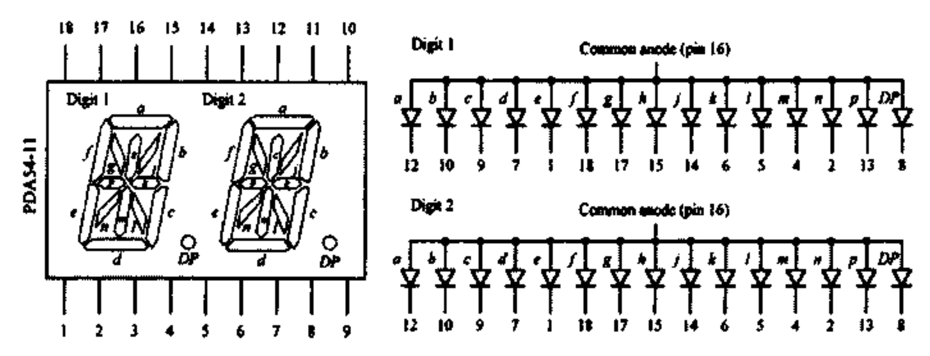
لدينا في هذا الشكل وحدة إظهار بمهبط مشترك تقاد بالطريقة الانتخابية. تتشارك كافة الأرقام على خطوط القطاعات (a-g) ولتزويد رقم بمعطيات إظهاره وجعل هذا الإظهار يبدو في حالة عمل دائم يجب تزويد الأرقام بمعطيات الإظهار بالتتالي وبسرعة عالية ويفعَّل إظهار أحد الأرقام عن طريق ترانزستور قيادة موصول مع الخط المشترك (وهو في حالتنا المهبط المشترك) فعند قيادة هذا الترانزستور إلى حالة (on) تصبح قطعة الإظهار المخصصة للرقم المراد تشغيله ممكّنة أما باقي الوحدات فتكون في حالة عائمة (floating) وفي الشكل المبيَّن تقاد ترانزستورات القيادة بواسطة متحكم صغري (microcontroller)، كما يقوم المتحكم ذاته بتأمين المعطيات المناسبة لدخل كاشف الإظهار (74HC4511).

وكمثال إذا أردنا إظهار العدد 1234 علينا كتابة برنامج للمتحكم بتوقيف عمل (turn-off) كافة الأرقام ماعدا رقم الـ MSD وهو الرقم اليساري ثم يُعطي المعطيات إلى كاشف الـ BCD وهذه المعطيات يجب أن تكون بحيث يظهر الرقم (1) على رقم الإظهار اليساري وبنفس الوقت يقود ترانزستور قيادة الرقم إلى حالة (on)، ثم يكرر المتحكم نفس الأعمال للرقم التالي (2) ثم 3 وحتى رقم الـ (LSD) وهو (4) ويعود ويكرر العمل طالما رغبنا في استمرار ظهور العدد (1234) على وحدات الإظهار.

2.I وحدات الإظهار الديوديَّة الحرفيَّة العدديَّة

1.2.I وحدة إظهار بسيطة

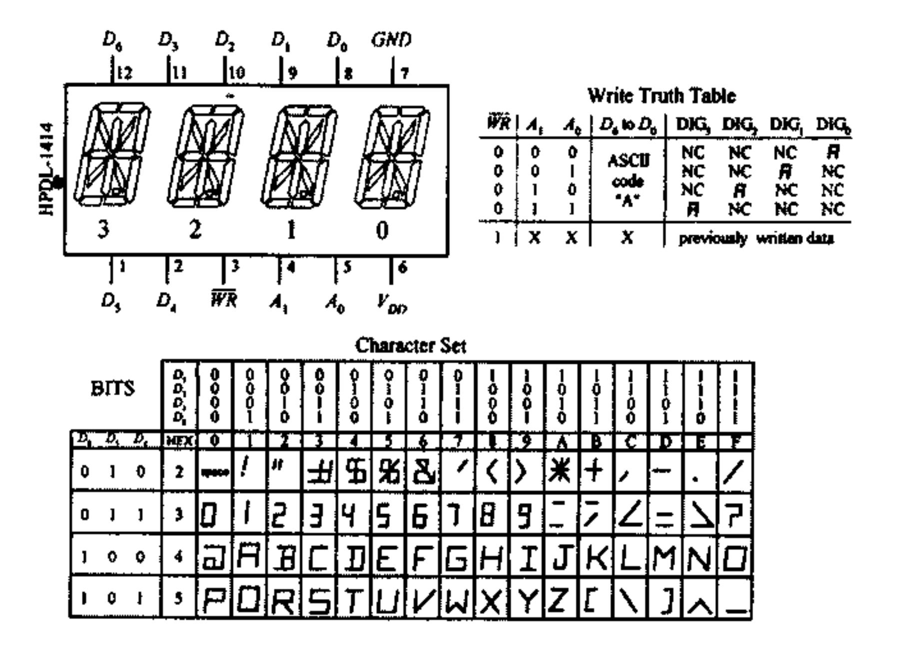
يبيِّن الشكل (5.I) وحدة إظهار من نوع المصعد المشترك لمحرفين 2-character، و14 قطاعاً (+ عشري)، ووحدات الإظهار هذه من نوع يمكن استخدامه لإظهار الحروف والأرقام. لاحظ أن قطاعات المحرفين موصولة مع بعضها داخلياً، وهذا يعني أن وحدة الإظهار هذه مصممة للعمل بقيادة انتخابية ويمكن استخدام متحكم صغري مع ترانزستورات قيادة للتحكم بالإظهار، ويُلاحظ أيضاً أن عدد الخطوط اللازمة للقيادة عالٍ نسبياً. يمكن أيضاً استخدام دارة قيادة إظهار متكاملة خاصة، مثل الدارة ICM7423B، وهي عبارة عن دارة قيادة لـ 14 قطاعاً 6-bit ASCII. إذا لم ترغب في استخدام وحدات الإظهار هذه، يمكنك استخدام وحدات الإظهار الحرفية العددية الذكية (Smart alpha numeric display) التي تحوي كل ما يلزمنا من دارات القيادة المنطقية كدارات القيادة، ومبدلات الشيفرة وغيرها.



الشكل (5.I): وحدات الإظهار الديودية alphanumeric.

2.2.I وحدات الإظهار الذكية (للأحرف والأرقام)

إن وحدة الإظهار HPDL-1414 هي وحدة إظهار ذكيّة لأربعة محارف و16 قطاعاً في كل محرف. وحدة الإظهار هذه مزودة بديودات الإظهار LEDs، وبذاكرة أربع كلمات ASCII، وبمولد 64 word character، وبدارات قيادة لــ (17) قطاعاً وبدارات قيادة لأربعة أرقام وبدارة المسح (Scanning) اللازمة من أجل انتخاب الإظهار، وهي متآلفة مع TTL وسهلة الاستخدام. تتقبل خطوط المعطيات (D_0) حتى (D_6) شيفرة ASCII بسبع خانات، أما مداخل الانتخاب الرقمي A_0، A_1 فتقبل شيفرة ثنائية (2-bit) وتستخدم هذه الشيفرة لتحديد رقم (digit) تتم إضاءته. يستخدم المدخل WRITE $\overline{WR}$ لتحميل معطيات جديدة إلى الذاكرة. وبعد كتابة مَحْرف إلى الذاكرة، تقوم الدارة المتكاملة بفك معطيات الـــ ASCII وتقود الإظهار وتنعشه دون الحاجة لأية دارات أو برامج خارجيّة.



$\overline{WR}$	A_1	A_0	D_6 to D_0	DIG_3	DIG_2	DIG_1	DIG_0
0	0	0	ASCII code "A"	NC	NC	NC	A
0	0	1		NC	NC	A	NC
0	1	0		NC	A	NC	NC
0	1	1		A	NC	NC	NC
1	X	X	X	previously written data			

الشكل (6.I): وحدة الإظهار الذكية HPDL-1414 من (Hewlett Packard).

3.2.I وحدات إظهار مصفوفات النقاط الذكية (للإظهار العددي والستة عشري)

يبيِّن الشكل (7.I) سلسلة وحدات الإظهار ذات المصفوفات النقطية (7 × 4) نوع HDSP-076X من إنتاج شركة Hewlett Packard وهي:

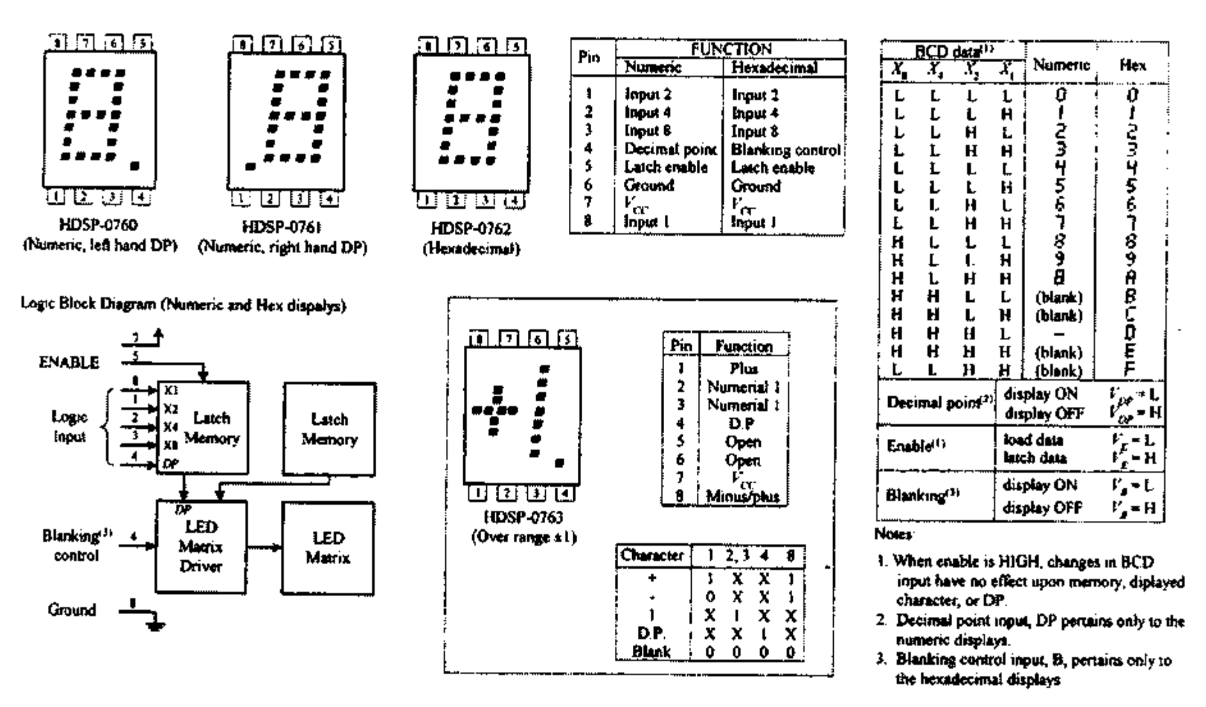
0760: وحدة إظهار عدديّة بنقطة عشرية في الطرف اليميني.

0761: وحدة إظهار عددية بنقطة عشرية في الطرف اليساري.

0762: وحدة إظهار ستة عشرية.

0763: وحدة إظهار لحالة خارج المجال ±1 (over range).

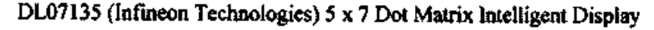
وكافة وحدات الإظهار هذه من النوع الذكي ومصنوعة من أنصاف النواقل وتحوي ضمناً ذاكرة معطيات (data memory)، وكاشف ترميز (decoder) ودارات قيادة الإظهار. تُطبق شيفرة BCD 4-bit على الأرجل 8، 1، 2 و3 في الإظهار العددي والستة عشري من أجل اختيار عدد من المحارف. انظر إلى جدول الحقيقة الموجود في الشكل. يوجد مداخل تمكين enable ومداخل عشرية decimal لوحدات الإظهار العدديّة، وعندما يكون مدخل التمكين في حالة high، لا يكون لأية تغيرات في مستويات BCD الدخل أي تأثير على ذاكرة الإظهار، ولا على المحارف الظاهرة على وحدة الإظهار ولا على النقطة العشريّة. لا تتوفر نقطة عشرية في وحدات الإظهار الستة عشرية ولكن توجد مداخل للتحكم بالتعتيم blanking وليس لهذه المداخل تأثير على ذاكرة الإظهار. تستخدم الأرجل 1، 2، 3 و4 و8 لاختيار إما "+" أو "-" أو "1" في حالات تجاوز المجال (over range) أو نقطة عشرية أو حالة تعتيم ـــ انظر جدول الحقيقة في الشكل. يُنصح بالعودة إلى نشرات معطيات Hewlett Packard للاطلاع على كافة تفصيلات وحدات الإظهار هذه.

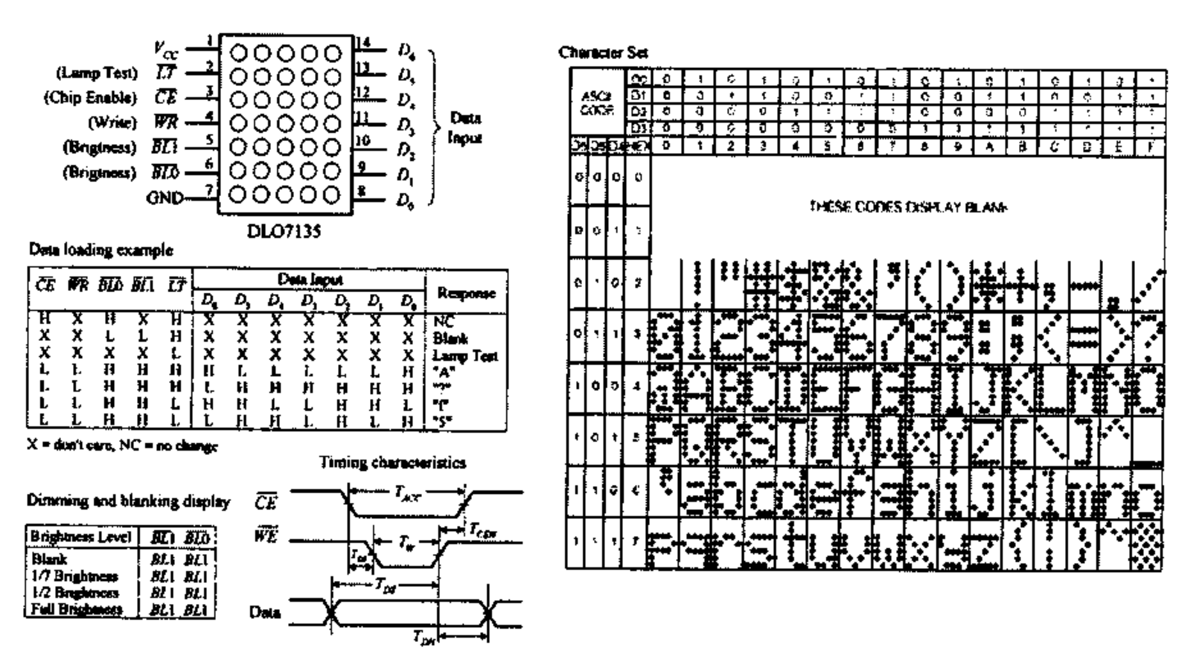


الشكل (7.I): سلسلة وحدات الإظهار HDSP-076x.

4.2.I وحدات الإظهار (مصفوفات النقاط 7 × 5)

يبيِّن الشكل (I.8) وحدات إظهار من نوع مصفوفات النقاط 7 × 5 طراز DL07135 من إنتاج شركة Infineon، ووحدات الإظهار المذكورة هي أيضاً من النوع الذكي وتملك هذه الوحدات مجموعة محارف ASCII وعددها (96) تتضمن الأحرف الصغيرة والكبيرة، بالإضافة إلى ذاكرة داخلية، ومولِّد محارف (character generator)، ودارة انتخاب إظهار وقيادة LEDs، ودارة اختبار (lamp test)، وتحكم بشدة الإضاءة (4 مستويات). تبين الجداول ومخططات التوقيت كيفية عمل هذه الوحدات ومن خلال هذه الجداول والمخططات يتكون لديك فهم عام لآلية العمل، وكما في الوحدات السابقة يُنصح بالعودة إلى نشرات معطيات شركة Infenion للاطلاع على مزيد من التفاصيل.





الشكل (I.8): مصفوفات النقاط 7 × 5 طراز DL07135.

وحدات الإظهار متعددة الأرقام (مصفوفات 7 × 5) من Siemens

وحدة الإظهار SLR2016: 4 أرقام، مصفوفة 7 × 5

وحدة الإظهار PDSP1880: 8 محارف، مصفوفة نقاط 7 × 5

قابلة للبرمجة وتستخدم لإظهار الحروف (الأحرف) والأرقام.

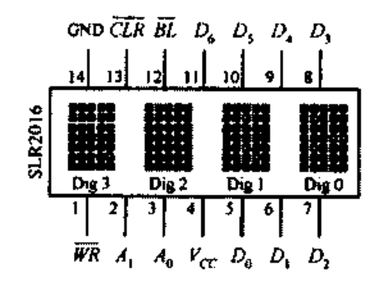
إن وحدة الإظهار SLR2016 هي عبارة عن وحدة إظهار لأربعة أرقام من نوع مصفوفة نقاط 7 × 5 وتحوي دارة CMOS داخلية.

تحوي الدارة المتكاملة على ذاكرة، كاشف 128 ASCII ROM، دارة انتخاب (Multiplexing Circuit) ودارات قيادة (drivers). لوحدة الإظهار SLR2016 خانتا عنونة (A_0, A_1) وسبعة مداخل تفرعية (D_0 - D_6) لشيفرة ASCII، مدخل كتابة $\overline{WR}$، مدخل تعتيم $\overline{BL}$ ومدخل تصفير $\overline{CLR}$ ويستخدم لتصفير ذاكرة RAM لمحارف الـ ASCII. تتكون مجموعة المحارف من 128 محرف ASCII خاص للغات الإنكليزية، الألمانية، الإيطالية، السويدية، الداينمركية والنرويجيَّة. يجب أن تكون

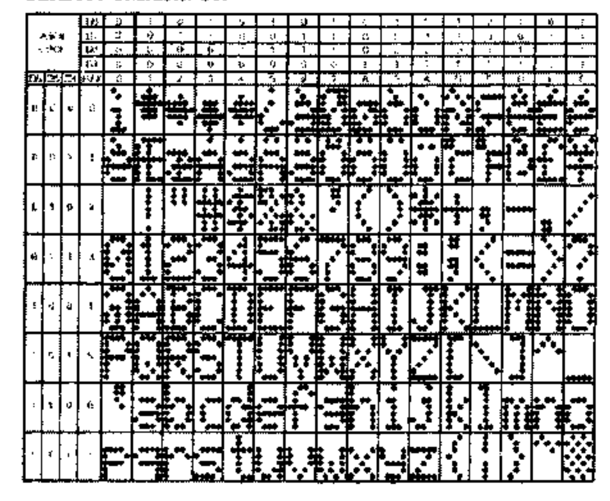
خانات الشيفرة (D_6 - D_0) وخانات العنونة (A_0, A_1) في حالة استقرار خلال دورة الكتابة لتخزين معطيات جديدة. يمكن أن تكون عملية إدخال المعطيات غير متزامنة (asynchronous). يُعرَّف الرقم (0) ــ digit 0 ــ بأنه الرقم اليميني بوضع $A_1 = A_2 = 0$، ويمكن تصفير كامل الذاكرة الداخلية للأرقام الأربعة بوضع مدخل $\overline{CLR}$ في حالة Low لمدة لا تقل عن 1 ms. يمكن تشكيل نظام إظهار متعدد المحارف باستخدام عدد من وحدات الإظهار SLR2016s لأن كل رقم يمكن عنونته بشكلٍ مستقل ويستمر بإظهار الرقم المخزَّن أخيراً حتى يتم استبداله بآخر.

إنّ وحدة الإظهار PDSP1880 مشابهة لوحدة الإظهار السابقة ولكنها تحوي ذاكرة ROM قابلة للبرمجة من قبل الشركة الصانعة لتأمين مجموعة محارف مخصصة، كما أنها مكونة من (8) أرقام ولكن وحدة الإظهار هذه تحتاج إلى جهد أكبر لفهمها. إذا كنت مهتماً بذلك عليك الرجوع إلى نشرة معطيات الجهة الصانعة.

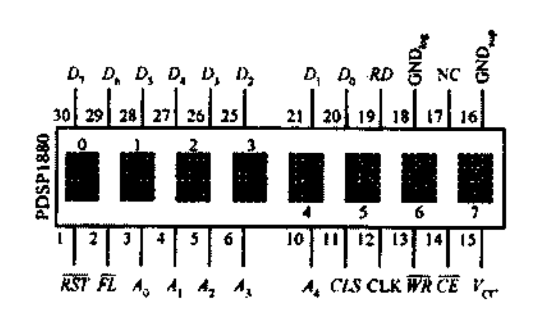
SLR2016 (Siemens) 4-Digit 5 x 7 Dot Matrix Alphanumeric Intelligent Display



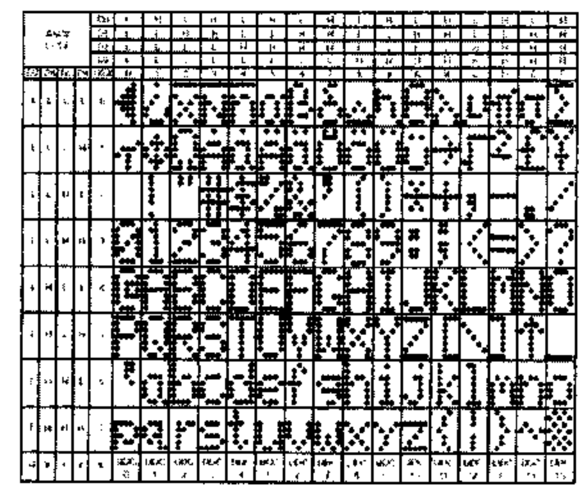
SLR2016 Character Set



PDSP1880 (Siemens) 8-Character 5 x 7 Dot Matrix Alphanumeric Programmable Display



PDSP1880 Character Set



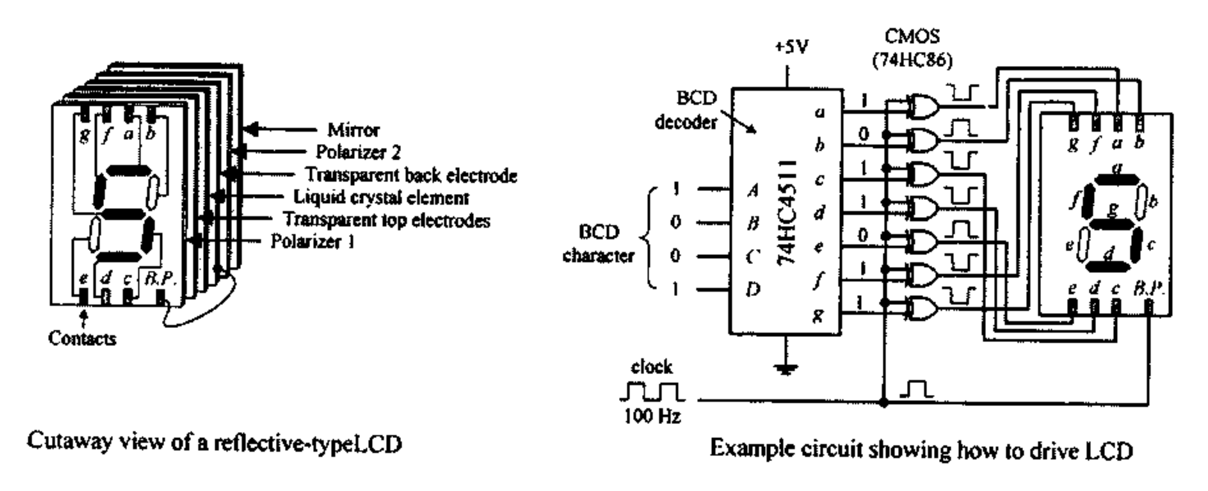
الشكل (I.9): وحدات الإظهار SLR2016 وPDSP1880 من Siemens.

3.I وحدات الإظهار بالكريستال السائل

إذا استخدم ديود مصدر للضوء LED في نظم CMOS الرقمية منخفضة الاستطاعة (كالأنظمة التي تتغذى من بطارية أو الأجهزة الإلكترونية التي تتغذى من الطاقة الشمسية)، فإن هذا الـــ LED سوف يستهلك جزءاً كبيراً من الطاقة المخصصة لتغذية النظام، وهذا الشيء يجب تجنبه خصوصاً في أنظمة CMOS التي تهدف أصلاً إلى تخفيض استهلاك الطاقة. تقدم وحدات الإظهار بالكريستال السائل LCDs (Liquid Crystal Displays) حلاً لهذه المشكلة لأنها تتصف بالاستهلاك القليل للطاقة، ولذلك يمكن اعتبارها حلاً مثالياً للإظهار في التطبيقات منخفضة القدرة، وبعكس الـــ LED فإن وحدات الإظهار LCDs لا تستخدم التيار لتوليد الإضاءة، وإنما تستخدم الضوء الموجود خارجياً (مثل ضوء الشمس (sunlight) أو إضاءة الغرفة (room lighting))، وكي تحدث الإضاءة المطلوبة للإظهار في وحدات LCDs هناك حاجة لقدر ضئيل جداً من طاقة الضوء الخارجي (وهذه الطاقة من مرتبة mw/cm^2). من أبرز سلبيات وحدات الـــ LCD انخفاض سرعة تغيُّر حالة الإظهار -(لابد من مرور زمن لإظهار محرف جديد بواسطة وحدات إظهار LCDs)، ويتراوح هذا الزمن من (40) إلى (100 ms). ويزداد هذا الزمن في درجات الحرارة المنخفضة، والشيء الثاني الذي يعتبر سلبية في وحدات الـــ LCDs هو ضرورة وجود ضوء خارجي، وقد تم التفكير بوضع ديود إضاءة خلف وحدات الـــ LCD، ولكن هذا الحل يعيدنا من جديد إلى استهلاك الطاقة المرتفع لهذا الديود.

1.3.I شرح مبدأ العمل الأساسي لوحدة إظهار LCD

تتكون وحدة إظهار LCD من عدة طبقات وهي طبقة المقطب (Polarizer)، مجموعة من الأقطاب الكهربائية الشفافة (transparent electrodes)، عنصر الكريستال السائل (Liquid Crystal element)، وقطب كهربائي خلفي شفاف، ومقطب ثان، ومرآة (mirror) (انظر الشكل 10.I اليساري).



الشكل (10.I): بنية وحدة إظهار LCD، ودارة مثال.

تستخدم الأقطاب العلوية الشفافة لتوليد القطاعات الخاصة بكل رقم (digit)، أو محرف (character)، أما القطب الكهربائي الخلفي فإنه يشكل مستوىً مشتركاً (common plane) ويسمى هذا المستوى عادة باسم المستوى الخلفي back plane (BP). توصل أقطاب القطاعات العلوية والقطب الخلفي إلى وصلات خارجية. عندما لا يوجد فرق في الجهد بين قطب أحد القطاعات (segments) الأمامية والقطب الخلفي، يظهر القطب الأمامي بلون فضي على خلفية فضية، أما عند وجود فرق في الجهد بين القطبين، فإن القطب الأمامي يظهر مظلماً على خلفية فضية.

تبيِّن الدارة اليمينية في الشكل (I.10) طريقة بسيطة لقيادة وحدة إظهار LCD سباعية القطع (7 segment). ويوجد في هذه الدارة كاشف BCD هو الدارة المتكاملة 74HC4511 وبوابات XOR لتوليد إشارات القيادة الأولية لوحدة الإظهار LCD والشيء الهام جداً الذي يجب ملاحظته في هذه الدارة هو إشارة نبضات Clcok حيث أن وحدات الإظهار LCD تحتاج إلى إشارات قيادة متناوبة (ac drive signals)، بدلاً من إشارات القيادة المستمرة (dc)، وهنا تستخدم إشارة clock (نبضات مربعة) كإشارة قيادة متناوبة. إذا استخدمت إشارات القيادة المستمرة، فإن المكوِّن الأساسي لوحدة الإظهار وهو الكريستال السائل يعاني من تغيرات كيميائية كهربائية. يتراوح تردد نبضات clock المثالية بين (25 Hz) وبضعة مئات الـ (Hz). تُطبق نبضات clock على القطب الكهربائي الخلفي (BP)، أما بوابات XOR فإنها تعمل كبوابات تمكين (enable gates) تمرر وتعكس الإشارة وتطبقها على قطب كهربائي علوي لأحد القطاعات (top electrode segment).
إذا كانت شيفرة الـ BCD هي (1001) أي (5 بالنظام العشري) فإن مخارج الكاشف a، c، d، f و g تكون في حالة high، أما المخارج (b) و(e) فتكون في حالة (Low)، عندما تصل نبضة clock موجبة فإن بوابات XOR الموصولة مع مخارج الكاشف التي هي في حالة high، تقوم بعكس مستويات high إلى حالة Low، أما بوابات XOR الموصولة مع مخارج الكاشف التي هي في حالة Low فإنها تعكس Low إلى حالة high.

يكون المستوى الخلفي (BP) خلال فترة استمرارية نبضة clock في حالة high، ولذلك تظهر فروقات في الجهد بين المستوى الخلفي (BP) وأقطاب القطاعات a، c، d، f و g وتظهر هذه القطاعات مظلمة، أما القطاعات (g) و(e) فإنها تظهر فضية بسبب عدم وجود فرق في الجهد بينها وبين المستوى الخلفي. عندما تنتقل نبضة clock إلى حالة Low يبقى الإظهار كما هو (بفرض عدم تغير شيفرة الـ BCD المطبقة على دخل الكاشف)، وذلك لأن كل ما حدث هو انعكاس في القطبيَّة ولا يؤثر ذلك على الخواص البصرية (optical) للإظهار.

I.3.2 الشرح التفصيلي لمبدأ عمل وحدات الإظهار بالكريستال السائل (فيزيائية العمل)

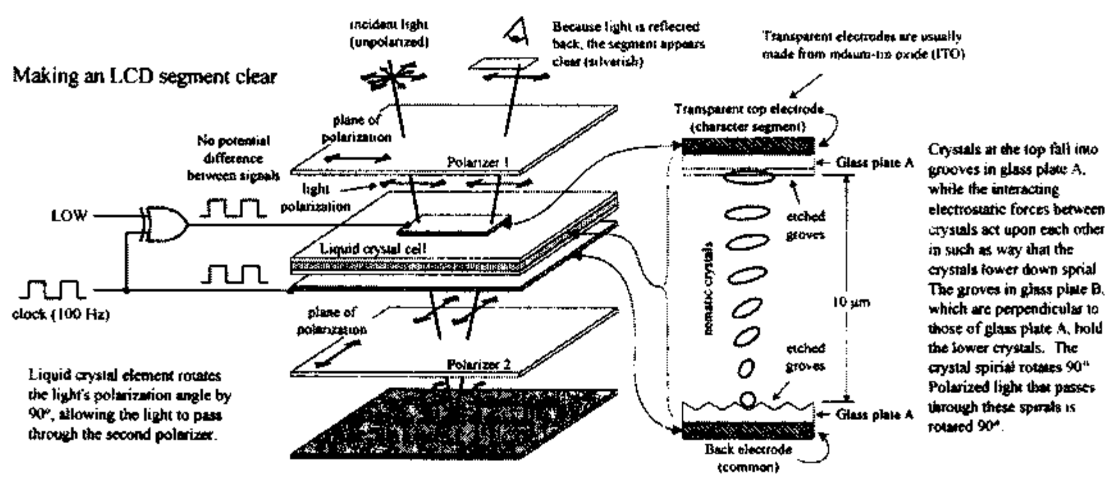
يبيِّن الشكل (I.11) كيفية توليد وحدة إظهار LCD لقطاع غير مضاء (فضي). عندما تكون إشارات التحكم المطبقة على القطب الخلفي وأحد الأقطاب الأمامية متفقة بالصفحة، لا يكون هناك أي فرق في الجهد بين القطبين فإن البللورات السائلة العضوية التي لها شكل السيجار ترتب نفسها بحالة لولبية، كما في الشكل، فالبللورة العلوية تتوضع بشكل أفقي بالنسبة لسطح الإظهار أما البللورة السفلية فتتوضع بشكل عمودي على سطح الإظهار. يتم الحفاظ على بللورة الكريستال العلوية وبللورة الكريستال السفلية في أماكنها بواسطة أخاديد صغيرة جداً تظهر منها حواف على السطح الداخلي للسطح الزجاجي للخلية، أما الكريستالات المتوضعة بين الكريستالة العلوية والسفلية فإنها تنحرف بزاوية 90° متقدمة بسبب القوى الكهربائية الساكنة الموجودة بين الكريستالات المتجاورة.
عندما يسقط ضوء مستقطب على منطقة من وحدة الإظهار تحوي هذه الكريستالات اللولبيَّة فإن زاوية استقطاب الضوء تدور بمقدار 90°.

بالنظر إلى وحدة الإظهار ككل متكامل نلاحظ ما يلي:

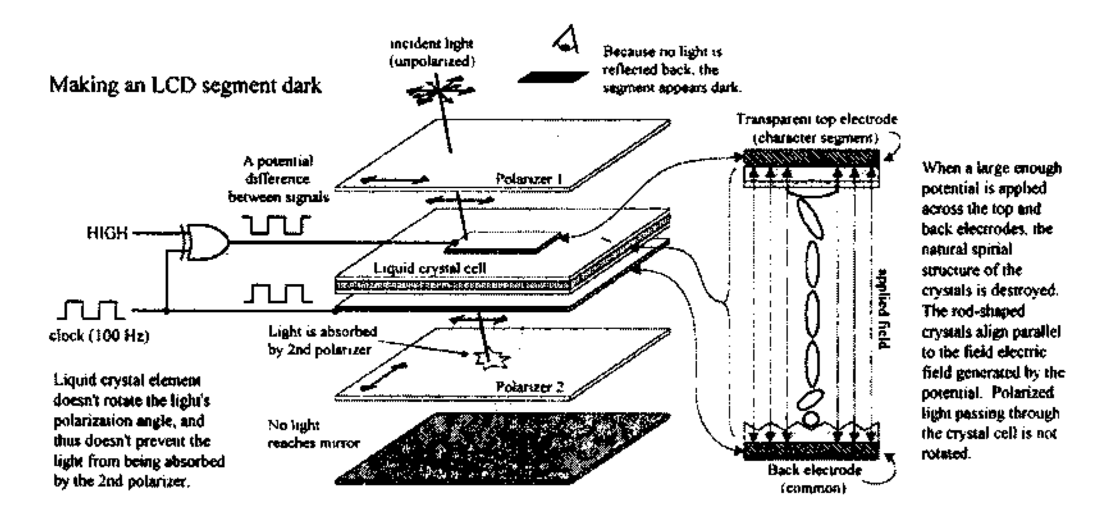
عندما يمر ضوء غير مستقطب عبر المقطب الأول (1) كما في الشكل، فإن الضوء يصبح مستقطباً بنفس اتجاه مستوى الاستقطاب للمقطب الأول. يمر الضوء المستقطب بعد ذلك عبر القطب العلوي الشفاف ويدخل خلية الكريستال السائل، وعند مروره عبر الكريستال السائل يتم تدوير استقطابه (90°)، يمر الضوء المستقطب الذي يخرج من خلية الكريستال عبر القطب الخلفي الشفاف والمقطب الثاني بدون مشاكل (إذا تصورنا عدم وجود خلية الكريستال السائل، فإن كل الضوء المستقطب الذي مر عبر المقطب الأول سوف يتم امتصاصه لأن لدينا مقطبات متصالبة). ينعكس الضوء المار عبر المقطب الثاني بواسطة المرآة ويمر عبر المقطب الثاني وخلية الكريستال السائل فيدور استقطابه 90° ثم يمر عبر المقطب الأول ويصل إلى عين المشاهد ويبدو هذا الضوء المنعكس فضي اللون. لاحظ أن خلفية وحدة الإظهار LCD تبدو فضية بسبب عدم وجود جهد على طرفي خلية الكريستال السائل في المنطقة الخلفية.

يبيِّن الشكل (12.I) كيفية توليد الـ LCD لقطاع مظلم. عندما تكون إشارات التحكم المطبقة على القطب الكهربائي الخلفي وقطب قطاع أمامي مختلفة بالصفحة يكون هناك فرق في الجهد بين القطبين وهذا يجعل الكريستالات ترتب نفسها بشكلٍ متوازٍ، كما في الشكل. عندما يمر الضوء من المقطب الأول عبر خلية الكريستال السائل لا يحدث أي شيء للضوء وتبقى زاويةً استقطابه كما هي وعندما يصل الضوء إلى المقطب الثاني يتم امتصاصه لأن زاوية استقطاب الضوء والمقطب الثاني متعامدتان.

ولا يصل ضوء إلى المرآة فلا ينعكس شيء عنها إلى عين المشاهد ويظهر القطاع مظلماً. يمثل الشكل (11.I) الكريستال السائل المسمى Standard twisted nematic display، ويوجد نوع آخر يسمى supertwisted nematic display وفيه يتم تدوير البللورات بزاوية 270° مقارنة مع الكريستالة السفلية والـ 180° الإضافية مقارنة مع الكريستال المعياري المشروح في الشكل تساعد على تحسين التفاوت (contrast) وزاوية الرؤيا.



الشكل (11.I): آلية إظهار قطاع فضي (غير عاتم).



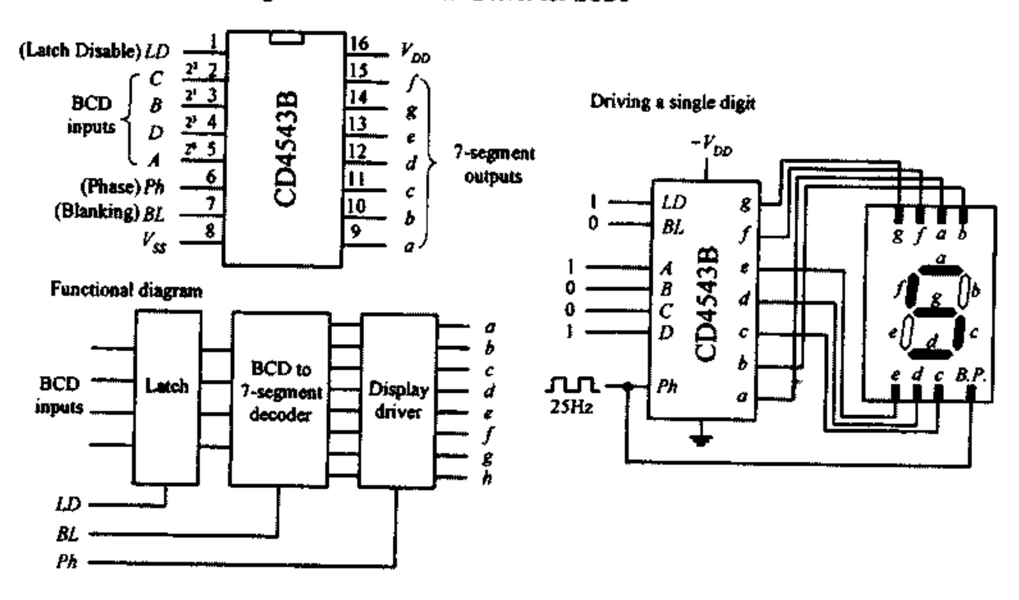
الشكل (12.I): آلية إظهار قطاع معتم.

3.3.I قيادة وحدات الإظهار بالكريستال السائل

الدارة المتكاملة CD4543B كاشف من BCD إلى إظهار سباعي القطع وماسك/فاك ترميز/ أداة قيادة من Texas Instruments

إن الدارة المتكاملة CD4543B المبينة في الشكل (13.I) هي عبارة عن كاشف من BCD إلى إظهار سباعي القطع وهي بنفس الوقت ماسك Latch/كاشف ترميز decoder/ وأداة قيادة driver مصممة لوحدات الإظهار بالكريستال السائل LCDs، وكذلك لوحدات الإظهارالعادية التي تعمل على LEDs. عند استخدام هذه الدارة لقيادة LCDs يجب تطبيق موجة مربعة في وقت واحد على المدخل (Ph) للدارة وعلى (BP) في وحدة الإظهار LCD.

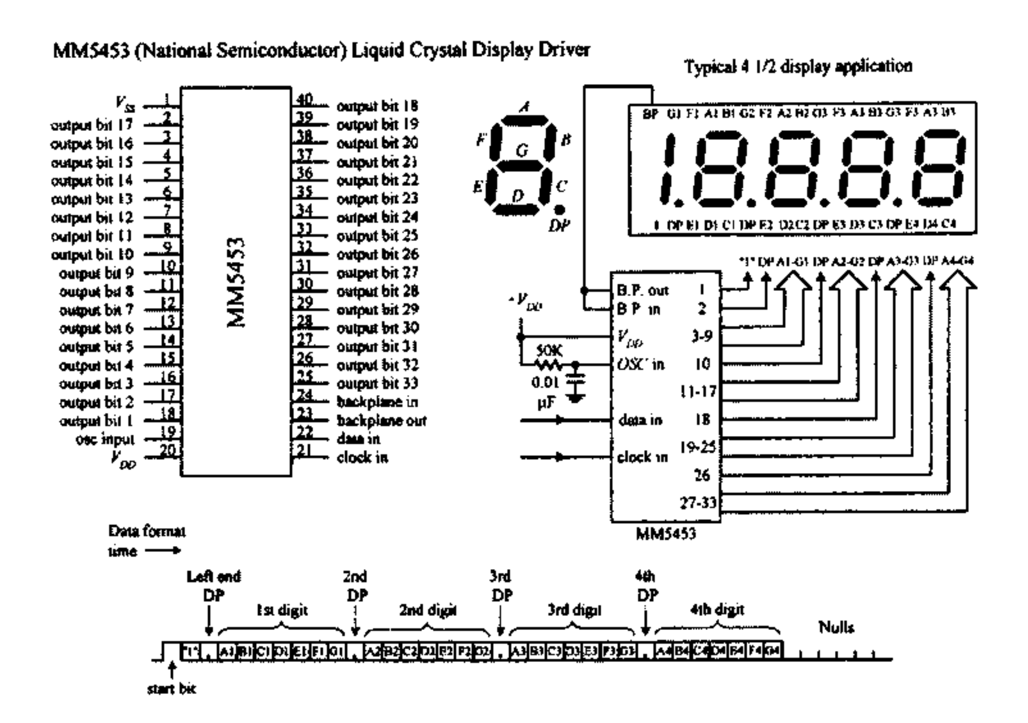
أما عند استخدامها لقيادة وحدات إظهار عادية LEDs فيجب تطبيق high على المدخل (Ph) عند قيادة وحدات إظهار من نوع مصعد مشترك. يُطبق high على المدخل (BL) عند الرغبة في تعتيم الإظهار بالكامل (وفي هذه الحالة توضع المخارج من (a) حتى (g) كلها في حالة Low. للدارة مدخل لإلغاء تمكين الماسك Latch Disable (LD) ويستخدم لمسك معطيات الدخل ويمنع تغيرات معطيات الدخل من تغيير حالة الإظهار.



الشكل (13.I): دارة قيادة الإظهار CD4543B.

دارة قيادة الإظهار LCD، MM5453 من (National Semiconductor)

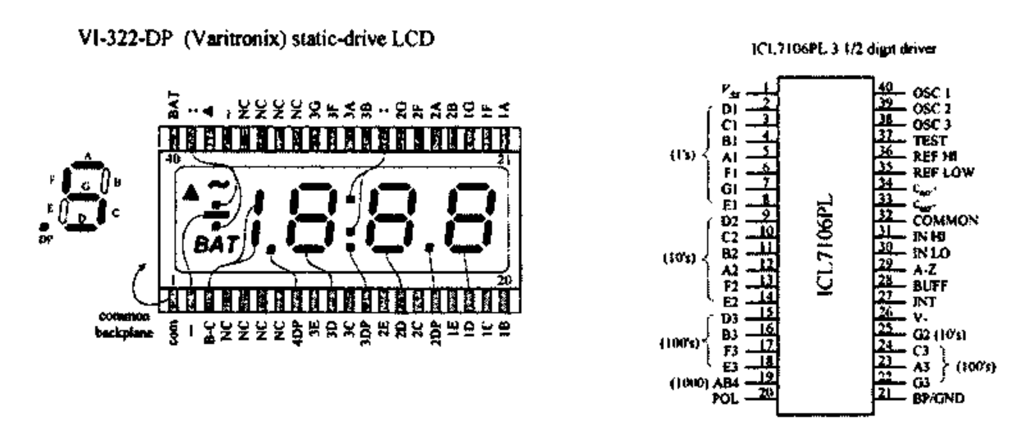
الدارة المتكاملة MM5453 هي دارة ذات (40) رجلاً ويمكنها قيادة (33) قطاعاً من وحدات الإظهار LCD، ولذلك فإنها تستخدم لقيادة وحدات الإظهار $4\frac{1}{2}$digit سباعية القطع. تحوي الدارة بداخلها قسماً مخصصاً لهزاز داخلي (ويتطلب هذا الهزاز وصل دارة RC خارجية) يولد نبضات مربعة لقيادة وحدة الإظهار LCD. يُطبق كود (شيفرة Code) تسلسلي على مدخل المعطيات من أجل تفعيل قطاعات معينة ويبدأ الكود أو الشيفرة بخانة بدء (start bit) (عادة تكون high) وتتبعها خانات المعطيات التي تحدد أياً من المخارج يُقاد إلى حالة high وأيها إلى حالة Low. يبيِّن الشكل (14.I) دارة إظهار كمثال، مع صيغة المعطيات اللازمة لقيادة إظهار $4\frac{1}{2}$digit (أربعة أرقام ونصف).



الشكل (I.14): الدارة المتكاملة MM5453 ودارة مثال، وصيغة المعطيات.

وحدة إظهار VI-322 DP LCD والدارة المتكاملة ICL7106

توجد أنواع من وحدات الإظهار LCD الخاصة، ويمكن الاطلاع عليها في الكتالوكات الإلكترونية، وكمثال عنها نورد وحدة الإظهار VI-322DP، وهي وحدة إظهار $3\frac{1}{2}$digit (إضافة إلى ~، +، BAT، Δ) ووحدة الإظهار هذه مبينة في الشكل (I.15)، ولكل قطاع في هذه الوحدة رجل مستقلة، وتستخدم في العديد من أجهزة القياس، ولقيادة هذه الوحدة عليك معرفة دارات القيادة التي تنصح بها الجهة الصانعة (Varitronix)، والجهة الصانعة تنصح باستخدام دارة القيادة ICL7106 من شركة (Intersil)، وهذه الدارة هي دارة قيادة لإظهار LCD/LED بـ $3\frac{1}{2}$digit، كما أنها دارة مبدِّل A/D (من تشاهي إلى رقمي)، وهذه الميزة تجعل وصل مخارج الحساسات مع الدارة مباشرة أمراً ممكناً. للاطلاع على معلومات مفصلة عن هذه الدارة ننصح بقراءة نشرة المعطيات من موقع شركة Intersil على شبكة الإنترنيت (www.intersil.com).



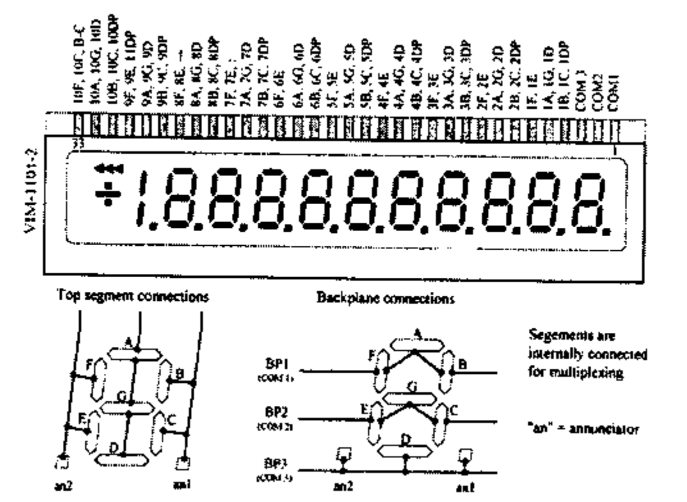
الشكل (I.15): وحدة الإظهار VI-322-DP، دارة القيادة ICL-7106PL.

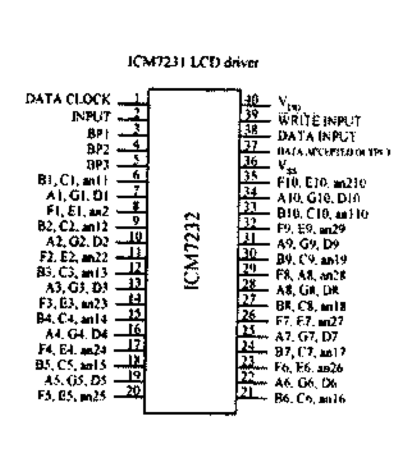
4.3.I وحدات الإظهار LCDs التي تقاد بطريقة الانتخاب

تعرفنا على أمثلة عن نماذج القيادة التقليدية (أو الساكنة) لوحدات الإظهار LCDs، حيث يكون لكل مقطع (segment) طرفه الخاص به، كما تم استخدام مستوى عام وحيد كقطب كهربائي خلفي. تصمم أنواع أخرى من وحدات الإظهار LCD بحيث تقاد بطريقة الانتخاب multiplexing وتسمى وحدات إظهار ذات قيادة ديناميكية (dynamic drive) أو وحدات إظهار منتخبة (multiplexed display)، وكما هي الحال في القيادة الانتخابية لوحدات الإظهار LEDs، فإن القيادة الانتخابية تخفض عدد الوصلات الخارجية بين وحدة الإظهار ودارة القيادة، ولكن تعقيد دارة القيادة يزداد (أو تحتاج إلى برمجة software) لا يتم وصل قطع متقابلة مع بعضها لتشكيل مجموعات، وتعنون هذه المجموعات باستخدام أقطاب متعددة كمستويات خلفية.

وحدة الإظهار VIM-1101-2 نوع LCD ودارة قيادة الإظهار ICM7231

يبيِّن الشكل (16.I) وحدة الإظهار VIM-1101-2 LCD، وهي من النوع المصمم للقيادة الانتخابية وتسمى هذه الوحدة triplexed display أي $\left(\frac{1}{3}\text{multiplexed}\right)$ لأن القطع الفعلية تجمَّع بثلاثيات، ويُلاحظ أن عدد أرجل وحدة الإظهار قليل بالمقارنة مع وحدة الإظهار السابقة VIM-322DPLCD ذات القيادة الساكنة وقد تم تخفيض عدد الأرجل عن طريق وصل قطع الأقطاب العليا (top electrode segments) مع بعضها، كما هو مبيَّن في الشكل، كما يُلاحظ أنَّ أقطاب المستوى الخلفي تتشارك كلها على ثلاثة خطوط مشتركة. إن إضاءة القطع المختلفة لوحدة الإظهار أمر صعب ويتطلب تتابعاً دقيقاً للعنونة وأشكال موجات خاصة، وهنا نبحث في نصائح الشركة الصانعة الأصلية Vartronics عن دارة قيادة متكاملة، ونجد أن شركة Vartronics تنصح باستخدام دارة القيادة المتكاملة ICM7232 وهذه الدارة مصممة لتوليد مستويات جهود وأشكال موجات لقيادة وحدة إظهار triplexed مخصصة لعشرة أرقام (10-digits)، ولكل رقم 7 قطع إظهار (7 segments) بمعلنين مستقلين (two independent annunciators) — مثل وحدة الإظهار VIM-1101-2. وتتم الكتابة إلى وحدة الإظهار بإدخال (6) خانات معطيات و(4) خانات عنونة تسلسلياً بواسطة نبضات clock إلى مسجل إزاحة ثم تكشف هذه الخانات وتكتب في وحدة الإظهار. يمكن الرجوع إلى نشرة معطيات شركة Intersil الخاصة بالدارة للاطلاع على مزيد من التفاصيل.



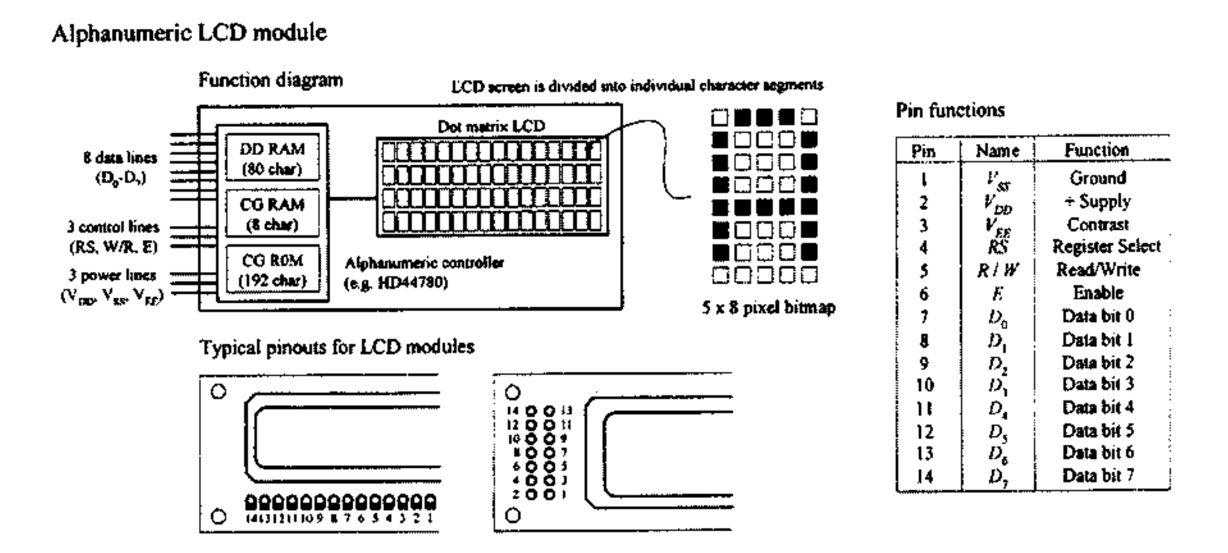


الشكل (16.I): وحدة الإظهار VIM-1101-2 ودارة قيادتها ICM7231

5.3.I وحدات الإظهار LCD من نوع مصفوفات النقاط الذكية

تستخدم وحدات الإظهار هذه لإظهار الأحرف والأرقام والرموز الأخرى، وتستخدم في الهواتف الخلوية، والآلات الحاسبة، وفي آلات المحاسبة في المحالات التجارية وفي الآلات الأخرى التي تزود المستخدم بمعلومات نصيَّة بسيطة، كما تستخدم هذه الأنواع من وحدات الإظهار في شاشات الحواسيب المحمولة، وتحوي هذه الوحدات مرشحات خاصة وإضاءة خلفية متعددة الألوان، وغيرها من الأمور الأخرى. سنركز الآن على وحدات الإظهار LCD المخصصة للإظهارات البسيطة للأحرف والأرقام.

تقسَّم وحدات الإظهار LCD العددية الحرفية (alphanumeric) إلى عدد من القطاعات (blocks) (5 × 8 pixel) والبيكسل هو أصغر عنصر صورة. يبين الشكل (17.I) وحدة إظهار مكونة من (20) عموداً و(4) صفوف وتتكون كل مجموعة عناصر صورة من 5 × 8 pixel. لتوليد محرف من مجموعة عناصر صورة (block) يجب وضع كل عنصر (pixel) من هذه العناصر في حالة (on) أو off، وكما تلاحظ فإن قيادة عدد كبير من عناصر الصورة تتطلب قدراً كبيراً من الدقة في القيادة، ولذلك لابد من استخدام دارة قيادة متكاملة ذكية.



Pin	Name	Function
1	V_{SS}	Ground
2	V_{DD}	+ Supply
3	V_{EE}	Contrast
4	RS	Register Select
5	R / W	Read/Write
6	E	Enable
7	D_0	Data bit 0
8	D_1	Data bit 1
9	D_2	Data bit 2
10	D_3	Data bit 3
11	D_4	Data bit 4
12	D_5	Data bit 5
13	D_6	Data bit 6
14	D_7	Data bit 7

الشكل (17.I): وحدة إظهار Alphanumeric LCD.

تقاد أغلب وحدات الإظهار الحرفية العدديّة (alphanumeric) بواسطة دارة قيادة HD44780 من إنتاج شركة Hitachi أو دارة مكافئة لها، وتحوي دارة القيادة المذكورة ذاكرة دائمة (CG ROM) تخزّن 192 محرفاً (عدداً أو حرفاً)، وذاكرة ولوج عشوائي (DD RAM) من أجل تخزين محتويات الإظهار، وذاكرة ولوج عشوائي ثانية (GG RAM) لحفظ رموز مخصصة، إضافة إلى خطوط دخل من أجل المعطيات والتعليمات ومخارج منتخبة لقيادة عناصر الصورة في وحدة الإظهار (LCD Pixels)، ومخارج إضافية من أجل الربط مع شرائح توسيع (expansion chips) لقيادة عناصر صورة أكثر (LCD pixels) وقد صممت دارة القيادة هذه للعمل مع وحدات الإظهار من نوع مصفوفات النقاط الذكيَّة وغالباً ما تكون موصولة معها وجاهزة للاستخدام. يمكنك بالطبع بناء وحدة الإظهار ووصلها مع دارة القيادة بنفسك ولكن عدد التوصيلات الدقيقة والكثيرة سيكون مجهداً لك.

وسنفترض من الآن أن كافة وحدات الإظهار المذكورة مقادة بواسطة وحدة القيادة (HD44780).

نظرة عامة على أرجل الدارة

إن عدد أرجل التوصيل في مودولات الإظهار (LCD modules) هو عادة (14) رجلاً: 8 أرجل (خطوط) للمعطيات، 3 خطوط للتحكم (RS, W/R, E) وثلاثة خطوط للتغذية (V_{DD}, V_{SS}, V_{EE}). الأرجل (2) V_{DD}، و(1) V_{SS} هي أرجل موجب وسالب التغذية. توصل V_{DD} مع الـ (V 5 +) أما الـ (V_{SS}) فتوصل مع الأرض. الرجل (3) V_{EE} هي رجل التحكم بتباين الإظهار، ويزداد التباين أو يقل بتغيير قيمة الجهد الموصول مع هذه الرجل.

ويمكن استخدام مقسم جهد يوصل أحد أطرافه مع V_{DD} والطرف الآخر مع الأرض والذراع المتغير مع V_{EE} لضبط التباين يدوياً. الخطوط (D_0) حتى (D_7) — الأرجل 7-14 هي خطوط ممر المعطيات. يمكن نقل المعطيات من وحدة الإظهار وإليها إما كبايت (مكون من 8-bit) أو على شكل 2 (nibbles)، العلوية (D_4 - D_7). الرجل (4) RS هي خط انتخاب المسجل Register select line. عندما تكون هذه الرجل في حالة Low فإن المعطيات المنقولة إلى وحدة الإظهار تفسر كأوامر (Commands) وتمثل بايتات المعطيات المقروءة من وحدة الإظهار حالة وحدة الإظهار. عندما يوضع الخط RS في حالة high يمكن نقل بيانات المحارف من وحدة الإظهار وإليها.

الرجل (5) $R/\overline{W}$ هي خط تحكم بالقراءة والكتابة، وعند كتابة أوامر أو محارف في وحدة الإظهار يوضع الخط $R/\overline{W}$ في حالة Low، ويوضع على حالة high لقراءة معطيات محارف أو معلومات عن الحالة من الوحدة. الرجل (6) E هي مدخل التحكم بالتمكين وتستخدم لتفعيل (لتحفيز) النقل الفعلي لمعطيات الأوامر أو المحارف من الوحدة وإليها، وعند الكتابة إلى الوحدة، فإن المعطيات الموجودة على الخطوط D_0 - D_7 تُنقل إلى الوحدة عندما يتلقى مدخل التمكين حالة انتقال من high إلى Low. عند القراءة من الإظهار تصبح المعطيات متوفرة على الخطوط D_0 - D_7 بعد تطبيق انتقال من حالة Low إلى high على مدخل التمكين وتبقى متاحة حتى تنتقل الإشارة إلى حالة Low ثانية. يبيِّن الشكل (18.I) مجموعة التعليمات (Instruction set) ومجموعة معياريَّة من المحارف لوحدة الإظهار، وسوف نتعرف بعد قليل على بعض الأمثلة التي توضح كيفية استخدام التعليمات وكيفية كتابة محارف إلى وحدة الإظهار.

دارة الاختبار المستخدمة لعرض كيفية التحكم بوحدة الإظهار (LCD Module)

يبيِّن الشكل (19.I) دارة اختبار بسيطة مناسبة لتعلم كيفية إرسال معطيات أوامر ومعطيات محارف إلى وحدة الإظهار. (وفي الواقع توصل وحدة الإظهار إلى معالج أو متحكم صغري كما هو مبيَّن في الطرف اليساري من الشكل، وسوف نناقش هذا النوع من الربط لاحقاً في هذا الفصل). تستخدم المفاتيح المربوطة مع خطوط مداخل المعطيات مقاومات شد pullup resistors كي تُطبق high (1) عندما تكون المفاتيح opened (مفصولة) وLow (0) عندما تكون المفاتيح موصولة (closed).

تُطبق جهود high أو Low على مدخل التمكين من مفتاح مزوَّد بمانع ارتداد (debounced toggle switch)، ويستخدم مانع ارتداد لتلافي توليد إشارات تمكين متعددة عند وصل المفتاح، لأن هذه الإشارات تولد (تخلق) تأثيرات غير مرغوبة كتوليد المحرف وتكراره أكثر من مرة على وحدة الإظهار. تستخدم المقاومة المتغيرة من أجل ضبط التباين. تم في هذه الدارة تأريض الخط ($R/\overline{W}$) لأننا نتعامل فقط مع حالة كتابة إلى وحدة الإظهار.

عند تطبيق القدرة على وحدة الإظهار

عند تطبيق القدرة (التغذية) على وحدة الإظهار، تقوم وحدة الإظهار بضبط نفسها على الإعدادات الولية، والإعدادات الأولية مبينة في مجموعة التعليمات ومشار إليها بنجمة، وكما بينا فإن وحدة الإظهار تنتقل فعلياً إلى حالة (off) في مرحلة الإعداد الأولي، وإذا حاولنا كتابة معطيات محارف إلى وحدة الإظهار فلن يظهر عليها شيء، ولإظهار شيء عليها علينا إرسال أمر إلى الوحدة نعلمها فيه أن عليها نقل الإظهار إلى حالة (on).

يمكن استخدام تعليمة Display & Cursor on/off لنقل الإظهار إلى حالة (on).

وبنفس الوقت تنتخب هذه التعليمة شكل المشيرة (Cursor). إذا طبقنا شيفرة الأمر (1111 0000) على الخطوط (D7 - D0)، وبالتأكد من أن الخط RS في حالة Low، كي تقوم وحدة الإظهار بتفسير المعطيات كأمر، تظهر مشيرة Cursor وتحتها خط في الزاوية اليسارية العلوية من الإظهار، ولكن قبل أن يصبح الأمر فعالاً يجب إرساله إلى الوحدة بوضع خط التمكين (E) في حالة Low لحظياً.

هناك تعليمة هامة يجب أن تُنفذ بعد وصل التغذية وهي أمر Function Set.

يقوم هذا الأمر بإخبار وحدة الإظهار بتشغيل (turn on) السطر الثاني عند استخدام إظهار بسطرين، كما يخبر وحدة الإظهار بنوع نقل المعطيات المستخدم (8 bit، أو 4 bit) وبصيغة عناصر الصورة التي سوف تستخدم (10 × 5) أو (7 × 5) pixel. توجد الصيغة 10 × 5 في بعض وحدات الإظهار ذات السطر الوحيد. بفرض أن الإظهار المستخدم في مثالنا هو إظهار بسطرين، فبإمكاننا إرسال الأمر (0011 1000) لإخبار وحدة الإظهار بتشغيل سطرين وبأن المعطيات ستنقل بنظام 8-bit وبأن صيغة عناصر الصورة لكل محرف هي Pixel (7 × 5). ولإرسال هذا الأمر نضع الخط (RS) في حالة Low ونطبق معطيات الأمر على الخطوط (D7 - D0) وننقل E إلى حالة Low.

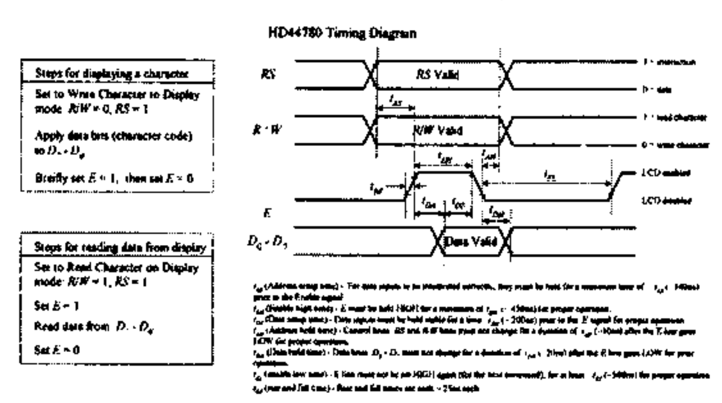
LCD Instruction Set

INSTRUCTION	RS	RW	D_7	D_6	D_5	D_4	D_3	D_2	D_1	D_0
Clear Display	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Display & Cursor Home	0	0	0	0	0	0	0	0	1	X
Character Entry Mode	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	S
Display & Cursor On/Off	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B
Display/Cursor Shift	0	0	0	0	0	1	D/C	R/L	X	X
Function Set	0	0	0	0	1	DL	N	F	X	X
Set CGRAM Address	0	0	0	1	A	A	A	A	A	A
Set Display Address	0	0	1	A	A	A	A	A	A	A
Poll the "Busy Flag"	0	0	BF	X	X	X	X	X	X	X
Write Character to Display [a]	1	0	D	D	D	D	D	D	D	D
Read Character on Dsplay [b]	1	1	D	D	D	D	D	D	D	D

I/D = Increment (I/D = 1)*/Decrement (I/D = 0) each byte written to display
S = Display shift on (S = 1), Display shift off (S = 0)*
D = Turn display on (D = 1), Turn display off (D = 0)*
C = Show cursor (C = 1), Hide cursor (C = 0)
B = Underline cursor (B = 0, C = 1), Blink cursor (B = 1, C = 1)
D/C = Move display (D/C = 1), Move cursor (D/C = 0)
R/L = Direction of shift: Shift right (R/L = 1), Shift left (R/L = 0)
DL = Set data interface length: 8-bit interface (DL = 1)*, 4-bit interface (DL = 0)
N = Number of display lines: 2 line mode (N = 1), 1 line mode (N = 0)*
F = Character font format: 5 x 10 dot (F = 1), 5 x 7 dot (F = 0)*
BF = Poll the Busy Flag: controller not busy (BF = 0), controller busy (BF = 1)
A = CGRAM or display address bit
D = Character data bit
a = Write character to display at the current cursor position
b = Read character on display at the current cursor position
X = Don't care
* = Initialization settings

Standard LCD Character Table

Steps used to Read and Write data to and from LCD module (HD44780 controlled)

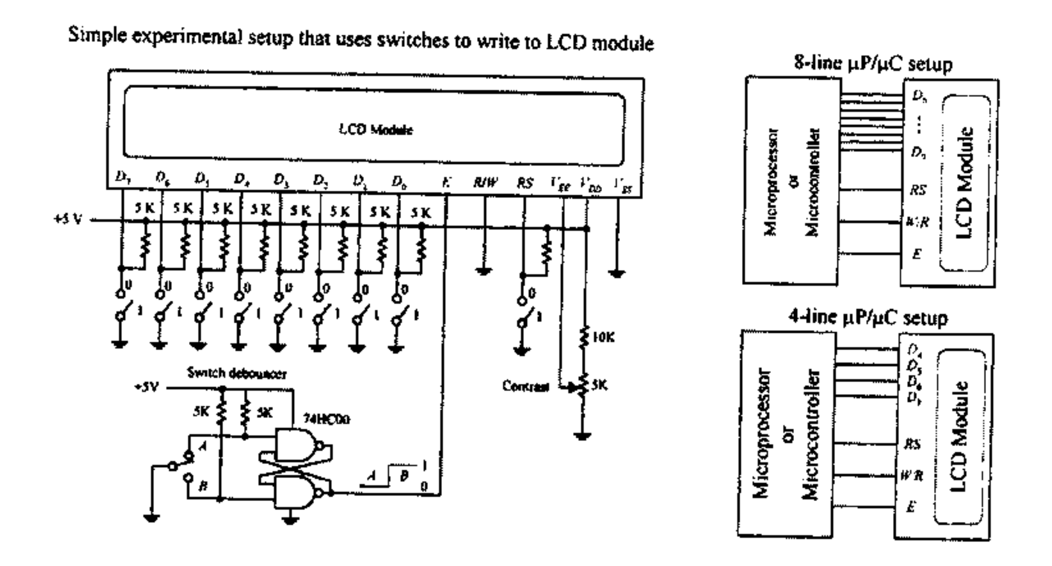


الشكل (ا.18): مجموعة تعليمات قيادة وحدة الإظهار وجدول المحارف المعيارية.

يمكن الآن محاولة كتابة محارف إلى وحدة الإظهار، بعد أن عرفت وحدة الإظهار الأبعاد (Format) التي يجب استخدامها، ومن أجل ذلك توضع وحدة الإظهار في نمط المحارف بوصل الخط RS إلى حالة high.

وفي الخطوة التالية نطبق إحدى شيفرات الـ 8-bit المبينة في جدول مجموعة محارف LCD المعيارية على خطوط المعطيات (D_7 - D_0)، فإذا أردنا مثلاً إظهار الحرف Q علينا أن نطبق (hex 51) 01010001.

ولإرسال معطيات هذا الحرف إلى وحدة الإظهار نطبق Low على الخط E، فتظهر Q على وحدة الإظهار. يُرسل الأمر (0000 0001) من أجل تصفير وحدة الإظهار، وعلينا التذكير بالحفاظ على RS في حالة Low وتطبيق نبضة Low على الرجل E.



الشكل (I.19): دارة تجريبيّة بسيطة تستخدم المفاتيح للكتابة إلى وحدة الإظهار LCD module.

العنونة

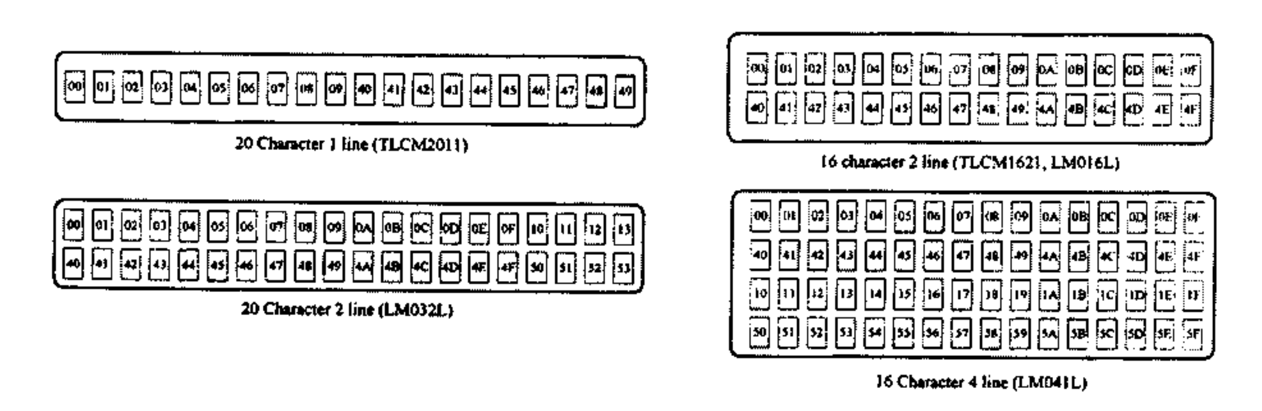
بعد وصل التغذية تتوضع المشيرة (Cursor) في الزاوية اليسارية العليا من الخط الأول للإظهار، وهذا الموقع من الإظهار مخصص للعنوان الستة عشري 00_H، وعند إدخال محارف جديدة تتحرك المشيرة آلياً إلى اليمين إلى عنوان جديد هو 01_H ثم 02_H، وهكذا، وهذا التزايد الآلي يجعل الأمر سهلاً عند إدخال المحارف. هناك حالات يكون فيها ضرورياً وضع المشيرة في مكان يختلف عن الموقع العنواني الأول، ولوضع المشيرة في موقع عنواني آخر يجب إدخال عنوان بداية جديد كأمر ويوجد (128) عنواناً مختلفاً يمكن اختيار أحدها، بالرغم من أنه ليس لكل هذه العناوين موقع إظهار خاص بها. وفي الواقع يوجد (80) موقع إظهار مخططة في السطر الوحيد في النمط أحادي السطر أو (40) موقع إظهار مخططة في كل سطر في النمط ثنائي السطر. وكما يتضح فإن كل مواقع الإظهار ليست مرئية بالضرورة على الشاشة في وقت واحد.

وسوف يتضح ذلك بعد قليل، وسنجرب الآن مثال عنوانٍ بسيط في وحدة ظهار تعمل بسطرين (وذلك بفرض توفر سطرين فعليًّا).

نستخدم أمر وضع العنوان من أجل توضيع المشيرة في الموقع المطلوب.

وهذا العنوان محدَّد (معيَّن) بالشيفرة الثنائية 0000 1000 + (القيمة الثنائية للعنوان الستة عشري)، ولإرسال عنوان يخبر المشيرة بالقفز إلى الموقع العنواني 07_H مثلاً علينا تطبيق:

1000 0111 = (1000 + 0000 0111) على المداخل D_7 - D_0 ويجب أن تكون RS في حالة Low وتطبق نبضة Low على (E).وعندها يجب أن تتوضع المشيرة في الموقع الثامن اعتباراً من جهة اليسار.من الضروري أن ندرك أن العلاقة بين العناوين ومواقع الإظهار تتغيَّر من وحدة إظهار إلى وحدة إظهار أُخرى، وأغلب وحدات الإظهار تكون من النوع ثنائي السطر. يبدأ السطر الأول بالعنوان (00_H) والسطر الثاني بالعنوان 40_H. يبيِّن الشكل (I.20) العلاقة بين العنوان ومواقع الإظهار لأنواع مختلفة من وحدات الإظهار. لاحظ أن وحدة الإظهار ذات الأربعة أسطر هي في الحقيقة من النوع ثنائي السطر وأن كل سطر مقسوم إلى قسمين، كما هو مبيَّن في الشكل.



الشكل (I.20): العلاقة بين العنوان ومواقع الإظهار لوحدات إظهار مختلفة.

إزاحة الإظهار

تملك وحدة الإظهار LCD، بغض النظر عن حجمها، على (80) موقعاً للإظهار يمكن الكتابة إليها، ولكن لا تظهر كل هذه المواقع حالاً في وحدات الإظهار الصغيرة، فمثلاً إذا أدخلنا كافة الأحرف (Letters) الأبجدية إلى السطر الأول في وحدة إظهار لـــ (20) محرفاً، فإن الأحرف من A إلى T سوف تظهر أما الأحرف (S) حتى (Z) مع المشيرة فإنها تكون مزاحة إلى يمين الشاشة ولا تظهر للناظر. ولجعل هذه الحروف مرئية يجب تطبيق أمر إزاحة إظهار المشيرة Cursor/Display Shift لإزاحة كافة مواقع الإظهار إلى اليسار وأمر الإزاحة إلى اليسار هو (0001 1000) وفي كل مرة يُطبق فيها هذا الأمر تزاح الحروف خطوة واحدة إلى اليسار، وفي مثالنا يجب تطبيق الأمر (7) مرات لإظهار الحروف من (T) إلى (Z) مع المشيرة.

يُطبق الأمر (0001 1100) من أجل الإزاحة إلى اليمين. من أجل إعادة المشيرة ثانية إلى العنوان 00_H ولإزاحة عنوان الإظهار 00_H إلى اليسار يمكن استخدام أمر إعادة المشيرة إلى مكانها الأساسي والأمر هو (0000 0010) أو يمكن استخدام أمر مسح الإظهار (0000 0001)، إلا أن هذا الأمر يمسح كافة مواقع الإظهار.

نمط إدخال المحرف

إذا لم تكن ترغب بإدخال المحارف من اليسار إلى اليمين، بإمكانك استخدام نمط إدخال الحرف لإدخال المحارف من اليمين إلى اليسار وللقيام بذلك يجب نقل المشيرة أولاً إلى الموقع الأول في الطرف اليميني من وحدة الإظهار، وبعد ذلك يتم إدخال أمر نمط إدخال الحرف (0000 0111)، وبذلك يتم وضع نمط الإدخال بحيث يتم التزايد الآلي مع الإزاحة إلى اليسار. عند إدخال المحارف بعد ذلك، فإن المحارف تظهر بدءاً من الطرف اليميني لشاشة الإظهار وينتقل الإظهار إلى اليسار مع كل محرف يتم إدخاله.

الأشكال المعرفة من قبل المستخدم

تستخدم الأوامر (0000 0100) حتى (1111 0111) لبرمجة أشكال معرَّفة من قِبل المستخدم، ولبرمجة هذه الأشكال على الشاشة، يتم تصفير الإظهار ويُرسل إلى وحدة الإظهار أمر وضع عنوان الإظهار (Set Display Address) لتوضيع المشيرة عند العنوان 00_H. عندها يمكن إظهار محتويات ثمانية مواقع محارف للمستخدم بإدخال معطيات ثنائية من (0000 0000) إلى (0000 0111) بالتتالي. تظهر هذه المحارف في البداية كأشياء غير مفهومة. وللبدء بتعريف الأشكال المعرفة من قِبل المستخدم يرسل أمر Set CGRAM إلى وحدة الإظهار ويمكن هنا أن تعمل أية قيمة بين (40_H) 0000 0100 و 1111 0111 ($7F_H$)، والمعطيات التي يتم إدخالها بعد ذلك سوف تستخدم لوضع (لتحديد) الأشكال المعرفة من قِبل المستخدم سطراً بعد الآخر. يمكن مثلاً تكوين فقاعة مضيئة بإدخال (0000 1110)، (0001 0001)، (0001 0001)، (0001 0001)، (0000 1110)، (0000 1010)، (0000 1110)، (0000 0100). لاحظ أن أول ثلاث خانات من اليسار هي دوماً صفر لأنه يوجد فقط خمسة عناصر صورة في السطر. يمكن تعريف أشكال من قِبل المستخدم بإدخال تتابع مكون من (8-byte) وهكذا. يبيِّن الشكل (I.21) ارتباط عناوين CGRAM مع عناصر قالب (كتلة) الإظهار.

يمكن برمجة حتى (8) أشكال معرفة من قِبل المستخدم وتصبح هذه الأشكال جزءاً من مجموعة المحارف ويمكن إظهارها باستخدام الشيفرات (0000 0000) حتى (0000 1111) أو (0000 1000) حتى (1111 0000)، وتعطي الشيفرتان نفس النتائج.

User Defined Graphic 1

Address hex	Data hex (binary)
40	0E (00001110)
41	11 (00010001)
42	11 (00010001)
43	11 (00010001)
44	0E (00001110)
45	0A (00001010)
46	0E (00001110)
47	04 (00000100)

User Defined Graphic 2

Address hex	Data hex (binary)
48	06 (00000110)
49	0F (00001111)
4A	09 (00001001)
4B	09 (00001001)
4C	09 (00001001)
4D	09 (00001001)
4E	0F (00001111)
4F	00 (00000000)

User Defined Graphics 3, 4, 5, 6 →

User Defined Graphic 7

Address hex	Data hex (binary)
78	11 (00010001)
79	11 (00010001)
7A	1F (00011111)
7B	00 (00000000)
7C	1F (00011111)
7D	14 (00010100)
7E	1F (00011111)
7F	00 (00000000)

الشكل (I.21): مجموعة أشكال معرَّفة من قبل المستخدم.

عند قطع التغذية عن وحدة الإظهار يتم فقدان الأشكال المعرَّفة من قبل المستخدم لأن ذاكرة CGRAM تطايريّة، ولذلك تخزن الأشكال الخاصة المعرَّفة من قبل المستخدم في ذاكرة EPROM خارجيَّة غير تطايرية أو في ذاكرة EEPROM، حيث يتم نسخها بواسطة معالج صغري وتحميلها إلى الإظهار بعد عودة التغذية.

نقل معطيات 4-bit

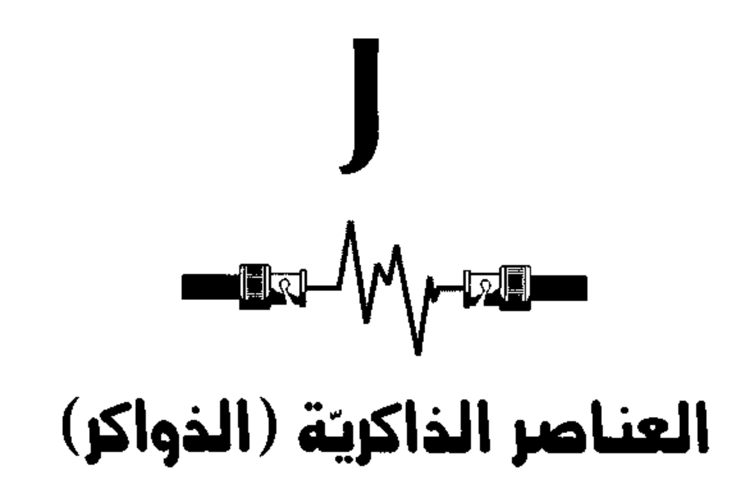
كما تبيَّن في أمر وضع الوظيفة (Function set command) فإن مودول الإظهار LCD قادر على نقل معطيات 8-bit أو 4-bit، وفي حالة نقل أربع خانات فقط 4-bit يتم استخدام أربعة خطوط معطيات هي (D_4 - D_7).

أما الخطوط الأربعة الأخرى (D_0 - D_3) فإنها تترك عائمة أو توصل مع مصدر التغذية. عند إرسال معطيات إلى وحدة الإظهار يتم إرسال مجموعتين من المعطيات كل واحدة منها مكونة من 4-bit بدلاً من إرسال كلمة 8-bit واحدة.

عند وصل التغذية إلى مودول الإظهار يتم إعداد المودول آلياً لإرسال المعطيات بنظام 8-bit، ولتغيير هذه الإعدادات إلى نظام (4-bit) يتم إرسال أمر تهيئة الوظيفة (Function Set Command) بالقيمة الثنائية (0000 0010) إلى مودول الإظهار،

وبما أنه تستخدم فقط أربعة خطوط نقل فإن الخانات الثمانية لا يمكن إرسالها، ولكن هذا ليس مشكلة، لأن الاختيار 8-bit/4-bit هو على خانة المعطيات D_4. واعتباراً من الآن فإن المحارف 8-bit وخانات الأمر يتم إرسالها كنصفين. تُرسل أولاً الخانات الأربع الأكثر أهمية ثم الخانات الأربع التالية، فمثلاً لكتابة المحرف (0100 1110) إلى وحدة الإظهار يجب وضع الرجل RS في حالة high، وتطبيق (0100) على خطوط المعطيات، وتطبيق نبضة Low على (E)، ثم تطبيق (1110) على خطوط المعطيات وتطبيق نبضة Low ثانية على (E). يستخدم نقل المعطيات 4-bit غالباً عند ربط وحدة (مودول) الإظهار LCD مع متحكم صغري ذي عدد محدود من خطوط الدخل/خرج I/O، انظر الشكل (19.I).





العناصر الذاكريّة (الذواكر)

تؤمن العناصر الذاكرية وسائل لتخزين المعطيات تخزيناً مؤقتاً أو دائماً من أجل استعادها مستقبلاً. يمكن أن يكون وسط التخزين دارة متكاملة مصنوعة من أنصاف النواقل (ذاكرة أوليّة)، أو شريطاً مغناطيسياً، أو قرصاً مغناطيسياً، أو قرصاً بصرياً (الذواكر الثانوية) ويمكن للذواكر الثانوية أن تخزن معطيات أكثر مما تستطيع الذواكر الأولية تخزينه لأن السطح الذي تخزن عليه المعطيات أكبر مقارنة مع الذواكر الأولية، ولكن الذواكر الثانوية تستغرق وقتاً أطول للولوج إلى المعطيات (كتابةً أو قراءةً) لأن المواقع الذاكرية على القرص أو الشريط يجب أن تتوضع فيزيائياً عند نقطة يمكن أن تتم عندها الكتابة أو القراءة بواسطة آلية كتابة/قراءة ميكانيكيّة. أما في الذواكر الأولية فإن المواقع الذاكرية ترتب في مناطق صغيرة جداً ضمن مصفوفة كبيرة حيث يمكن الولوج إلى كل موقع ذاكري بسرعة (خلال زمن لا يتجاوز بضعة نانو ثانية) بتطبيق إشارة العنونة المناسبة على الأسطر ضمن المصفوفة.

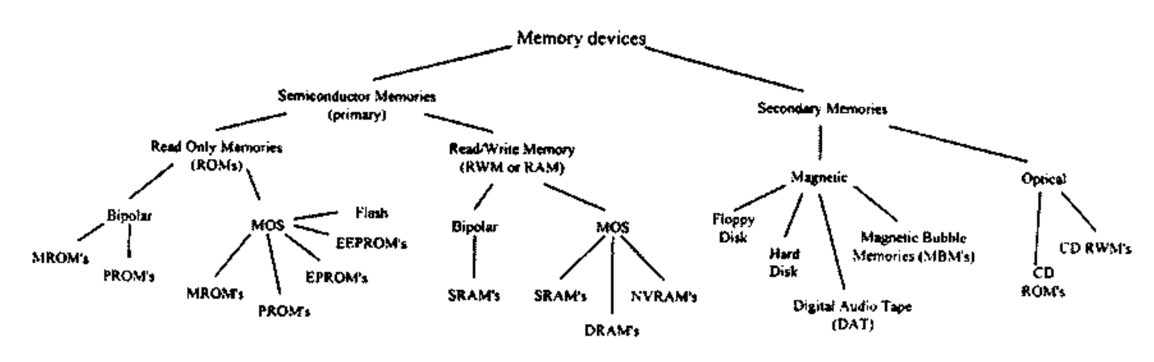
يبيّن الشكل (ل.1) ملخصاً للذواكر الأولية والثانوية. سندرس في هذا الملحق فقط الذواكر الأولية لأنها شائعة الاستخدام في تصميم الأجهزة أكثر من الذواكر الثانوية. تستخدم الذواكر الثانوية بشكلٍ خاص لتخزين الكميات الضخمة من معطيات الحواسيب، والمعطيات الصوتية، أو معطيات الصور. تعتمد تقنية تصميم الذواكر الأولية هذه الأيام على ترانزستورات الـ MOSFETS. يمكن أيضاً استخدام الترانزستورات ثنائية القطبيّة في الدارات المتكاملة للذواكر، ولكنها أقل استخداماً من ترانزستورات الـ MOSFET لأن كمية المعطيات التي تخزن فيها أقل ولكنها تمتاز بأنها أسرع من ذواكر الـ MOSFET، إلا أن فجوة السرعة بين النوعين أصبحت ضئيلة هذه الأيام.

تتكون عائلة الذواكر الأولية من عائلتين فرعيتين أساسيتين:

- عائلة ذواكر القراءة فقط Read Only Memories (ROMs).
- ذواكر القراءة/الكتابة Read/Write memories (RWM).

وتسمى هذه الذواكر باسم ذواكر الولوج (الوصول) العشوائي (random access memories) وتسمى اختصاراً باسم ذواكر RAM.

يوجد ضمن كل واحدة من هذه العوائل الفرعية عوائل متفرعة عنها كما هو مبيّن في الشكل (ل.1). سنبدأ الآن بدراسة ذواكر ROM.



الشكل (J.1): العوائل الأساسيّة للذواكر وعوائلها الفرعيّة.

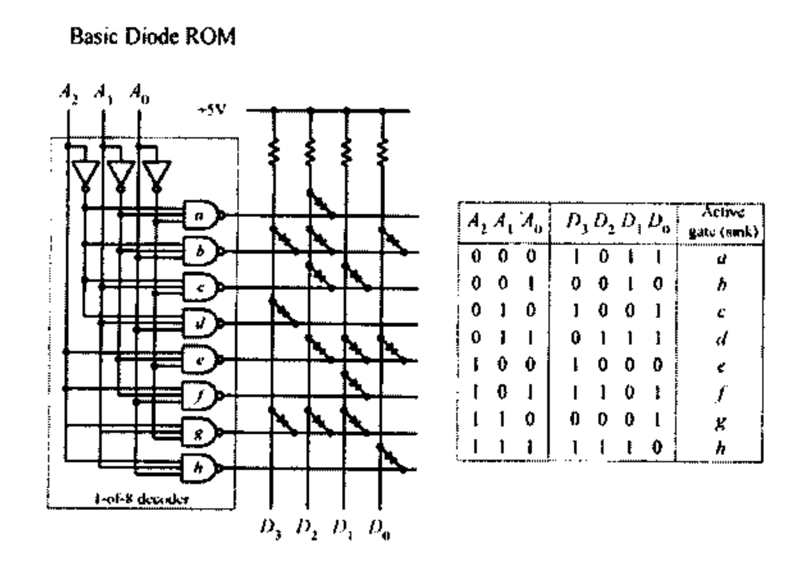
J.1 ذواكر القراءة فقط

تستخدم ذاكرة القراءة فقط، أو ذاكرة ROM من أجل التخزين الدائم للمعطيات ويمكن في هذه الذواكر الولوج عشوائياً إلى مواقع الذاكرة كما هي الحال في ذواكر RAM، ولكن ذواكر ROM لا تفقد المعطيات عند قطع التغذية عنها. تستخدم ذواكر ROM في أغلب الحواسيب لحفظ تعليمات الإقلاع (تعليمات استعادة نظام التشغيل من القرص، تعليمات تهيئة المنافذ والمقاطعة، تعليمات تخصيص المكدس، وغيرها)، وتفعل هذه التعليمات عند وصل التغذية إلى الحاسوب. تستخدم ذواكر ROM في تطبيقات المتحكمات الصغرية (microcontroller applications)، وفي الأجهزة ذات الوظائف البسيطة والألعاب وغيرها من التطبيقات، حيث يوضع كامل برنامج التشغيل في ذاكرة ROM. تستعيد وحدة المعالجة المركزية CPU للمتحكم الصغري تعليمات البرنامج، وتستخدم ذاكرة RAM من أجل التخزين المؤقت للمعطيات خلال تشغيل التعليمات المخزونة في ذاكرة ROM. تستخدم ذواكر ROM أحياناً في بعض الأجهزة الرقمية من أجل تخزين الجداول أو روتينات (routines) تحويل الشيفرات الخاصة، فمثلاً يمكن استخدام المعطيات الرقميَّة من خرج مبدل تشابهي — إلى رقمي لعنونة كلمات مخزنة للمكافئ الرقمي لقراءة درجة الحرارة بالدرجة المئوية (Celsius) أو بالفهرنهايت (Fahrenheit). كما يمكن استخدام ذواكر ROM كبديل للدارات المنطقيَّة المعقدة، فبدلاً من استخدام دارات كبيرة من البوابات للحصول على جدول حقيقة معيَّن، يمكن برمجة ذاكرة ROM بحيث تعطي الخرج المطلوب عند تطبيق معطيات الدخل. التطبيقات الأخيرة المذكورة أصبحت غير مستخدمة هذه الأيام حيث يستخدم المتحكم الصغري (microcontroller) للقيام بهذه الوظائف والأعمال. تستخدم ذواكر ROM للقراءة، ولا يمكن الكتابة إليها بعد برمجتها. توجد بعض أنواع الذواكر مثل EPROM وEEPROM التي يمكن مسح المعطيات المخزونة فيها وبرمجتها من جديد وكذلك الأمر بالنسبة لذواكر Flash memories. قبل أن نبدأ بالتعرف على ذواكر EPROMS والـ EEPROMS سوف نتعرف على بعض المبادئ الأساسية للذواكر.

J.2 ذاكرة ROM بسيطة مكونة باستخدام ديودات

سندرس الدارة البسيطة المبينة في الشكل (J.2) لنأخذ من خلالها فكرة عن آلية عمل ذواكر ROM.

إن ذواكر ROM المستخدمة هذه الأيام نادراً ما تستخدم خلايا ذاكرة ديودية، وتستخدم بدلاً منها خلايا ذاكرة ترانزستورية مشكلة على شرائح سيلكونية. كما أن ذاكرة ROM الفعلية تكون مزودة بعوازل خرج ثلاثية الحالة يمكن تفعيلها أو إلغاء تفعيلها بتطبيق إشارة تحكم (في حالة عدم التفعيل تكون مخارج الذاكرة في حالة ممانعة عالية). يُتيح الخرج ثلاثي الحالة إمكانية فصل الذاكرة عن ممر المعطيات الموصول معها (فصلاً كهربائياً) وليس فصلاً فيزيائياً. تظهر المعطيات دوماً على خطوط الخرج في ذاكرتنا الديودية البسيطة، أما التخطيط الأساسي للذاكرة (أو النموذج الأساسي للذاكرة) وكاشف العنوان والخلايا الذاكرية فهي تقريباً نفسها في كل الذواكر. توجد للذواكر خواص إضافية ولكننا سوف نناقشها فيما بعد، أما الآن فإننا سنتعرف على بعض التسميات والمصطلحات المستخدمة في مجال الذواكر.



A_2	A_1	A_0	D_3	D_2	D_1	D_0	Active gate (sink)
0	0	0	1	0	1	1	a
0	0	1	0	0	1	0	b
0	1	0	1	0	0	1	c
0	1	1	0	1	1	1	d
1	0	0	1	0	0	0	e
1	0	1	1	1	0	1	f
1	1	0	0	0	0	1	g
1	1	1	1	1	1	0	h

الشكل (ل.2): ذاكرة ROM بسيطة.

يبيِّن الشكل ذاكرة ROM بسيطة تستخدم فيها دارة متكاملة IC ككاشف للعنوان من أجل الولوج إلى ثماني كلمات كل واحدة منها مكونة من 4-bit مخزونة في مصفوفة ديودات. تُقرأ المعطيات من المخارج D_0 حتى D_3.

تتكون مصفوفة الديودات من أسطر وأعمدة ويمثل تقاطع السطر مع العمود موقع خانة فعندما يوصل سطر مع عمود عبر ديود فإن خط معطيات الخرج الموافق ينتقل إلى حالة Low (0) وذلك عند اختيار السطر الموافق بواسطة كاشف العنوان عبر المداخل A_2 - A_0. (عند عنونة سطر معيَّن فإن بوابات NAND تمتص تياراً ولذلك يمر التيار من مصدر التغذية عبر الديود إلى خرج البوابة وهذا يجعل خط المعطيات الموافق في حالة Low). عند عدم وجود ديود بين سطر وعمود فإن خط المعطيات الموافق ينتقل إلى حالة high (1) وذلك عند اختيار السطر الموافق بواسطة كاشف العنوان، حيث لا يوجد مسار للتيار باتجاه الأرض في هذه الحالة. الذاكرة المبينة في الشكل تسمى ذاكرة ROM 4 × 8 (أي ثماني كلمات مختلفة، وكل واحدة منها بطول 4-bit).

يمكن زيادة حجم الكلمات بإضافة أعمدة جديدة إلى المصفوفة، وكذلك يمكن زيادة عدد الأسطر وعدد مداخل العنونة وعندها يزداد عدد الكلمات التي يمكن تخزينها في الذاكرة. ويمكن باستخدام هذا المبدأ تشكيل ذاكرة m × n ROM.

ل.3 المصطلحات المستخدمة لوصف حجم الذاكرة وتنظيمها

إن الذاكرة المنظمة كمصفوفة (n × m) تستطيع تخزين (n) كلمة مختلفة بطول m-bit أو تستطيع تخزين (n × m) خانة معلومات.

يتطلب الولوج إلى (n) كلمة مختلفة $\log_2(n)$ خط عنونة، فمثلاً تحتاج ذاكرة ROM البسيطة في الشكل (ل-2) إلى $\log_2(8) = 3$ خطوط عنونة (وربما تبدو كتابة $8 = 2^3$ مألوفة أكثر). في الذواكر الانتخابية (multiplexed memories) وفي الذواكر ذات الدخل التسلسلي يتم تخفيض العدد الفيزيائي لخطوط العنونة أو يتم إدخال معلومات العنونة إلى الذاكرة تسلسلياً مع المعطيات وغيرها من المعلومات، وسوف نتطرق إلى ذلك لاحقاً.

في الذواكر المتكاملة العملية يكون عدد خطوط العنونة عادة (8) خطوط أو أكثر وذلك في الذواكر ذات الدخل التفرعي. يبيِّن الجدول (ل-1) الحجوم الشائعة للذواكر، وفي هذا الجدول يستخدم الـــ 1 K للتعبير عن 1024 bits وليس عن 1000 bit كما قد تظن عند رؤية الحرف (K) وفي العُرف الرقمي نعتبر أن:

$2^1 = 2, 2^2 = 4, 2^3 = 8, ..., 2^8 = 256, 2^9 = 512, 2^{10} = 1024 = (1 K)$
$2^{11} = 2048 = (2 K), ... 2^{18} = 262144 = (256 K),$
$2^{19} = 524288 = (540 K); 2^{20} = 1048576 = (1 M\text{-mega});$
$2^{21} = 2097152 = (2 M); ...., 2^{30} = 1073741824 = (1 G\text{-giga}).$

وعندما تذكر نشرة معطيات ذاكرة أن حجمها (64 K) عليك أن تقرأ تفصيلات المواصفات لمعرفة التنظيم الفعلي للذاكرة والذي يمكن أن يكون $(8 K \times 8) = 8192 \times 8$ أو $(4 K \times 16) = 4096 \times 16$ أو $(2 K \times 32) = 2048 \times 32$ أو $(16 K \times 4) = 16384 \times 4$.

قد تواجهك المصطلحات KB، MB أو GB وهذه المصطلحات لا تدل على (1 K) 1024 أو (1 M) 1048576 أو (1 G) 1073741824 بت من المعطيات ولكنها تعني أن الذاكرة ذات السعة (1 KB) يمكنها عملياً تخزين $1 K \times 8 = (8 K)$ bits، وبالمثل فإن الذاكرة ذات السعة 1 MB تخزّن $1 M \times 8 = 8 M$ bits، والذاكرة ذات السعة 1 GB تخزن $1 G \times 8 = 8 G$ bits.

الجدول (J.1): سعات (حجوم) شائعة للذواكر

عدد المواقع الذاكرية	عدد خطوط العنونة	عدد المواقع الذاكرية	عدد خطوط العنونة	عدد المواقع الذاكرية	عدد خطوط العنونة
1,048,576 (1 M)	20	16,384 (16 K)	14	256	8
2,097,152 (2 M)	21	32,768 (32 K)	15	512	9
4,194,304 (4 M)	22	65,536 (64 K)	16	1024 (1 K)	10
8,388,608 (8 M)	23	131,072 (128 K)	17	2.048 (2 K)	11
16,777,216 (16 M)	24	262,144 (256 K)	18	4.096 (4 K)	12
33,554,432 (32 M)	25	524,288 (540 K)	19	8.192 (8 K)	13

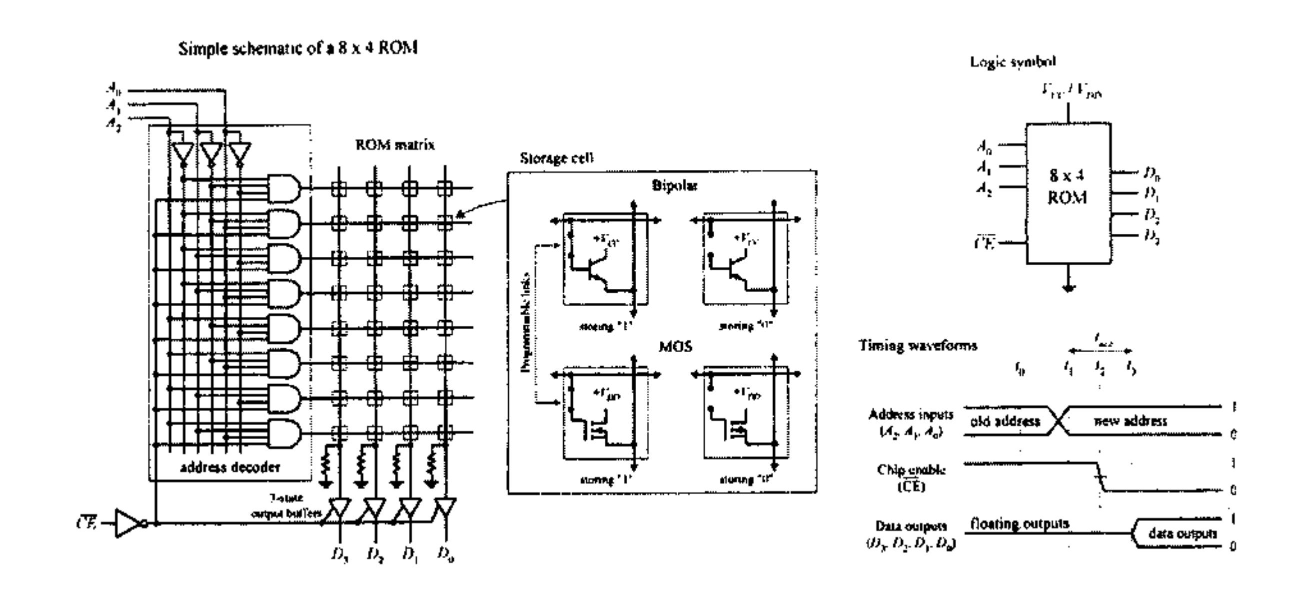
J.4 ذاكرة ROM بسيطة قابلة للبرمجة

يبيِّن الشكل (J.3) تمثيلاً أكثر دقة لذاكرة من نوع ROM وتحوي كل خلية ذاكرية على ترانزستور ووصلة قابلة للانصهار. في الحالة الابتدائية تكون كافة الوصلات القابلة للانصهار موجودة في أماكنها وفي هذه الحالة تكون كافة الترانزستور مستقطبة لتكون في حالة (on) وبذلك يتم تخزين واحدات (1 s) في كافة خلايا الذاكرة. عند قطع (صهر) الوصلة ينتقل ترانزستور خلية الذاكرة إلى حالة (off) وتخزِّن الخلية جهداً منخفض المستوى Low (أو صفر 0). لاحظ أن هذه الذاكرة مزودة بعوازل خرج ثلاثية الحالة وتبقى هذه العوازل المخارج عائمة حتى تطبيق Low على دخل تمكين الشريحة $(\overline{CE})$ Chip Enable، وتسمح هذه الميزة بوصل ذاكرة ROM مع ممر المعطيات.

يبيِّن الشكل (J.3) مخططاً تفصيلياً للذاكرة مع أشكال إشارات العنونة والتمكين اللازمة لتفعيل عملية القراءة، ومن أجل قراءة المعطيات المخزونة في موقع ذي عنوان معطى، يوضع مدخل تمكين الشريحة على حالية high، وذلك من أجل إلغاء تفعيل الشريحة (لإزاحة المعطيات القديمة من خطوط خرج المعطيات)، انظر t_0 في الشكل، وعند اللحظة t_2 يُطبق عنوان جديد على خطوط العنونة الثلاثة (A_0، A_1، A_2)، وعند t_2 يوضع مدخل $(\overline{CE})$ على حالة Low مما يجعل المعطيات المعنونة المخزونة في الذاكرة تظهر على خطوط المعطيات D_0، D_1، D_2 وD_3. وطبعاً لا تظهر هذه المعطيات حالاً على خطوط الخرج وإنما تتأخر زمناً قصيراً جداً من t_2 إلى t_3 وذلك بسبب تأخير الانتشار بين إشارة تمكين الشريحة والإشارة التي تصل إلى خطوط تمكين عوازل الخرج. يُسمى الزمن بين t_1 وt_4 في لغة الذاكرة باسم زمن الولوج (access time) ويتراوح هذا

الزمن بين (10 ns) وبضع مئات النانو ثانية ويتعلق ذلك بتقنية تصنيع الذاكرة. ولكن كيف يمكن فصْل الوصلة القابلة للبرمجة (programmable link)، أو كيف نبرمج الذاكرة ROM؟

والسؤال الثاني الذي يتبادر إلى الذهن هو هل يمكن إعادة الوصلة القابلة للبرمجة إلى حالتها الأولى بعد فتحها (فصلها)؟ أي هل يمكن إعادة برمجة ذاكرة ROM؟ هذا ما سنجيب عليه في الفقرات التالية.



الشكل (J.3): مخطط تفصيلي لذاكرة 8 × 4 ROM.

5.J الأنواع المختلفة من ذواكر الـ ROM

يوجد نوعان من ذواكر ROM، نوع يبرمج مرة واحدة ونوع آخر قابل لإعادة البرمجة، أما النوع الذي يبرمج مرة واحدة فيتضمن ذواكر ROM ذات القناع mask ROMs (MROMs) وذواكر PROM (ROM قابلة للبرمجة).

ويوجد نوعان أساسيان من الذواكر القابلة لإعادة البرمجة، النوع الأول هو ذواكر يمكن مسح محتوياتها وإعادة برمجتها erasable programmable (EPROM) ROM وذواكر ROM التي تمسح محتوياتها كهربائياً وتعاد برمجتها (EEPROM) electrically erasable programmable ROM إضافة إلى نوع يسمى flash memory (ذاكرة ومضية).

1.5.J ذواكر ROMs ذات القناع

إن ذواكر ROM ذات القناع MROM هي ذواكر خاصة تبرمج مرة واحدة ودائمة من قِبل الجهة الصانعة بإضافة أو حذف ديودات أو ترانزستورات ضمن مصفوفة الذاكرة. يتم تزويد الجهة الصانعة بجدوَل حقيقة يوضح ترتيب البيانات (المعطيات) المطلوب تخزينها في الذاكرة وتقوم الجهة الصانعة اعتماداً على جدول الحقيقة بتوليد قناع (mask) يستخدم لتشكيل التوصيلات الداخلية في مصفوفة الذاكرة خلال عملية التصنيع، ولذلك لا تعتبر عملية تصنيع ذاكرة خاصة رخيصة الكلفة، وإنما هي مكلفة في الواقع وقد تصل كلفة بعض هذه الذواكر إلى 1000 $ ويكون من المجدي دفع هذه الكلفة إذا كان هناك إنتاج لعدد لا بأس به منها لاستخدامها في أجهزة من نفس النوع، وبحيث لا تتطلب هذه الأجهزة تعديلاً لمحتويات الذاكرة، عندها تنخفض الكلفة كلما زاد عدد الذواكر المطلوب إنتاجها. تستخدم ذواكر (MROMs) في

الحواسيب لتخزين تعليمات نظام التشغيل وكذلك لتخزين معطيات تستخدم لفك ترميز تعليمات لوحة المفاتيح إلى تعليمات تقود صمام الأشعة المهبطية لجهاز المرقاب (monitor).

J.2.5 ذواكر ROM القابلة للبرمجة

ذواكر PROMs هي ذواكر ROMs قابلة للبرمجة بواسطة وصلات قابلة للصهر (fusible-link)، وبعكس ذواكر MROMs فإن المعطيات لا تخزن في الذاكرة عند التصنيع، ولكن المصنع يزودك بذاكرة على شكل دارة متكاملة مصفوفتها نظيفة (مليئة بالواحدات 1 s) ويختلف عدد الخانات (n × m) وترتيب الذاكرة حسب نوع ذاكرة ROM ولبرمجة الذاكرة يجب حرق كل وصلة قابلة للصهر بواسطة نبضة جهد عالٍ (21 V مثلاً).

وتحتاج عملية التحريق للفيوزات (الوصلات الداخلية القابلة للصهر) إلى وحدة برمجة ذواكر PROM وتحوي هذه المبرمجة على وحدة مكونات صلبة (hardware unit) توصل إليها الذاكرة PROM التي ستتم برمجتها، بالإضافة إلى كبل برمجة يوصل مع جهاز الحاسب (مع المنفذ التسلسلي للحاسوب). يتم باستخدام برنامج (software) تقدمه الجهة الصانعة إدخال ترتيب الذاكرة المطلوب في البرنامج الذي يُشغل على الحاسوب ثم يُضغط مفتاح فيقوم البرنامج بإرسال تعليمات إلى وحدة البرمجة الخارجية لتقوم بتحريق الوصلات المناسبة في الذاكرة. تعتبر عملية برمجة ذواكر PROM سهلة بعد معرفة كيفية استخدام برنامج قيادة عملية تحريق الوصلات المنصهرة، وبعد أن تتم عملية البرمجة لا يمكن تغيير البرنامج المخزون في الذاكرة وإذا حدث أي خطأ في عملية البرمجة يجب العودة من البداية واستخدام ذاكرة جديدة نظيفة. كانت ذواكر PROM شائعة الاستخدام منذ عدة سنوات مضت إلا أنها أصبحت نادرة الاستخدام هذه الأيام.

I.3.5 الذواكر EPROMs, EEPROMs; Flash memories

إن أكثر أنواع ذواكر ROM المستخدمة هذه الأيام هي ذواكر EPROMs، EEPROMs وذواكر الـ Flash memories، ويمكن مسح محتويات هذه الذواكر وإعادة برمجتها بعكس ذواكر PROM السابقة، وهي مناسبة جداً لتصميم الأجهزة التي تتطلب مستقبلاً تغير محتويات الذاكرة أو تجديد البرامج المخزونة في الذواكر.

ذواكر EPROMs

ذاكرة EPROM (Erasable programmable ROM) هي ذاكرة تتكون من عدد من ترانزستورات MOSFET، ولترانزستورات MOSFET الموجودة في بنية الذاكرة بوابة إضافية عائمة موجودة تحت بوابة التحكم ومعزولة عن بوابة التحكم وعن القناة بين المصرف والمنبع بطبقة من الأوكسيد (انظر الشكل J.4). في حالة الذاكرة غير المبرمجة تكون البوابة العائمة غير مشحونة ولا تؤثر على عمل بوابة التحكم والتي تؤدي عند عنونتها إلى تمرير جهد عالٍ high (1) إلى خطوط المعطيات. لبرمجة ترانزستور معيَّن تطبق نبضة جهد عالٍ (حوالي 12 V) بين طرف بوابة التحكم وطَرف المصرف فتؤدي هذه النبضة إلى حقن الكترونات عبر الطبقة العازلة إلى البوابة العائمة وتسمى هذه العملية باسم الحقن الإلكتروني الساخن. تبقى شحنة سالبة على البوابة العائمة بعد إزالة النبضة وتبقى هذه الشحنة موجودة في ظروف العمل الطبيعيَّة.

يؤدي وجود هذه الشحنة السالبة إلى تعطيل عمل بوابة التحكم، وعند عنونة بوابة التحكم تمنع الشحنات السالبة على البوابة العائمة وصول جهد عالٍ إلى خطوط المعطيات وتظهر المعطيات المعنونة كجهد منخفض Low أو (0) منطق.

عند الرغبة في إعادة برمجة ذاكرة EPROM، يتم نزع الذاكرة من الدارة ثم تزال الملصقة التي تغطي نافذة الذاكرة، وبعد ذلك تزال كافة الشحنات المخزونة على البوابات العائمة بتعريض نافذة الذاكرة إلى أشعة فوق بنفسجية (UV) وتؤدي هذه الأشعة إلى تحرير الإلكترونات المخزونة في مناطق البوابات المعزولة بتزويد هذه الإلكترونات بالقدرة الكافية لتجاوز العازل. يستغرق زمن مسح محتويات الذاكرة بالأشعة تحت الحمراء حوالي (20) دقيقة ويُحدَّد عدد مرات إعادة برمجة الذاكرة EPROM بعدة مئات وبعدها ينخفض أداء الذاكرة كثيراً.

الشكل (J.4): شكل ذاكرة EPROM وبنية ترانزستور MOSFET في هذه الذاكرة بالمقارنة مع ترانزستور MOSFET عادي.

تستخدم ذواكر EPROM في التطبيقات التي تحتاج إلى ذواكر غير تطايرية في منظومات المعالجات الصغرية والتي قد تعاد عملية برمجتها لاحقاً وتستخدم كثيراً عند اختبار نماذج الدارات للتأكد من جودة البرامج وملاءمتها للتطبيق المطلوب وبعد نجاح التجارب يتم استبدال ذواكر EPROM بذواكر MROMS إذا كان الإنتاج سيتم بأعداد كثيرة. تستخدم ذواكر EPROM في منظومات المعالجات الصغريَّة ويكون دورها الأساسي هو تخزين البرنامج الأساسي للمعالج أو للمتحكم (سنتعرف على مزيد من التفصيلات في الملحق K).

ذواكر EEPROMs

ذاكرة EEPROM (electrically erasable programmable ROM) هي ذاكرة لا تحتاج إلى أشعة تحت حمراء لمسح محتوياتها ولا يجب نزعها من الدارة لبرمجتها، بل يمكن انتقاء خلايا ذاكرية ومسحها باستخدام نبضات كهربائية متحكم بها. تتكون خلية الذاكرة في ذواكر EEPROMs من ترانزستورين، أحد هذين الترانزستورين يستخدم لتخزين المعلومات أما الترانزستور الآخر فيستخدم لمسح الشحنة عن البوابة العائمة للترانزستور الأول. عند تطبيق مستوى جهدي مناسب على الترانزستور الثاني يصبح بالإمكان مسح خلايا ذاكرية منتقاة بدلاً من الحاجة لمسح كل خلايا الذاكرة كما هو الحال في ذواكر EPROM. إحدى سلبيات ذواكر EEPROM بالمقارنة مع ذواكر EPROM هي حجم ذواكر EEPROM الكبير بسبب استخدام ترانزستورين لكل خلية ذاكرية، ولكن تقنيات التصنيع الجديدة هذه الأيام ساهمت كثيراً في تخفيض الحجم. تستخدم ذواكر الـ EEPROMs كثيراً في التطبيقات التي تتطلب تذكر الإعدادات السابقة عند فصل التغذية عن الجهاز، فهي تستخدم بكثرة مثلاً في نواخب أجهزة التلفزيون لتتذكر القناة التي كان الجهاز يعمل عليها وكذلك لتتذكر إعدادات شدة الصوت لمضخم الصوت. تستخدم ذواكر EEPROMs أيضاً في منظومات المعالجات الصغرية والمتحكمات الصغرية لتخزين البرنامج الرئيسي.

الذاكرة الومضية

تعتبر الذاكرة الومضية هي خطوة التطور التالية في تقنيات ذواكر ROM وتجمع ميزات ذواكر EPROM وذواكر EEPROM. تمتلك الذاكرة الومضية خاصية إمكانية البرمجة وهي موجودة ضمن الدارة (مثل ذاكرة EEPROM) وكثافة التخزين العالية مثل ذواكر EPROM.

بعض أنواع الذواكر الومضية قابلة للمسح كهربائياً، ولكن يجب مسحها وإعادة برمجتها بواسطة جهاز مماثل لجهاز برمجة ذواكر EPROMs وبعض الأنواع الأخرى من الذواكر الومضية تعتمد في عملها على ترانزستورين في كل خلية ذاكرية ويمكن مسح محتوياتها وإعادة برمجتها كلمة ــ كلمة.

تتميز الذواكر الومضية بأزمنة الكتابة والمسح القصيرة جداً والتي تعتبر أفضل من أزمنة المسح والكتابة في ذواكر EEPROMs.

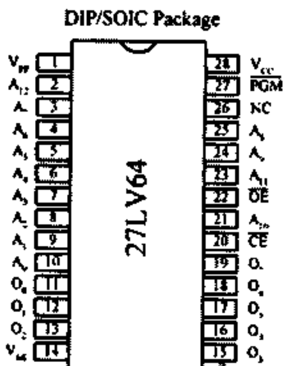
أصبحت الذواكر الومضية شائعة الاستخدام كأوساط تخزين لكميات كبيرة من المعلومات وتستخدم في الكاميرات الرقمية حيث يتم إدخال بطاقة ذاكرة ومضية عالية السعة مباشرة إلى الكاميرا وتقوم هذه الذاكرة بتخزين مئات الصور عالية الدقة، كما تستخدم أيضاً في أجهزة الهواتف النقالة وفي أجهزة الاستماع إلى التسجيلات الموسيقية وفي الحواسيب الصغيرة النقالة، وفي تطبيقات أخرى عديدة.

ل.4.5 عينات من الدارات المتكاملة لذواكر EPROM وEEPROM من إنتاج شركة (Microship)

ذاكرة CMOS EPROM منخفضة الجهد نوع 27LV64

الذاكرة 27LV64 هي ذاكرة (8 K × 8) منخفضة الجهد (3 V) مصممة للعمل في التطبيقات التي تغذى من بطاريات، وهي من نوع CMOS EPROM (انظر الشكل ل.5). يمكن الولوج إلى أي بايت ضمن الذاكرة بسرعة أكبر من (200 ns) عند جهد تغذية (3 V). تحتاج هذه الذاكرة إلى (13) خط عنونة (A_0 - A_{12}) من أجل الولوج إلى 8192 كلمة 8-bit (8 K). تُقرأ المعطيات من مخارج الذاكرة (O_7 - O_0) وعند كتابة معطيات إلى الذاكرة تستخدم هذه الخطوط أيضاً. للذاكرة مجموعة أطراف أخرى هي خط التمكين ($\overline{CE}$). تمكين الشريحة، تمكين الخرج ($\overline{OE}$)، وتمكين البرنامج ($\overline{PGM}$). V_{PP} محجوز لجهد البرمجة، V_{CC} هو طرف يوصل مع موجب جهد التغذية (5 V+ أو 3 V+)، V_{SS} أرضي، NC يعني أن هذا الخط غير موصول داخلياً مع أي شيء في الدارة. NU يعني أنّ هذا الخط غير مستخدم (لا يسمح بأية توصيلات خارجية مع هذه الرجل).

27LV64 (Microchip) 64K (8K x8) CMOS EPROM

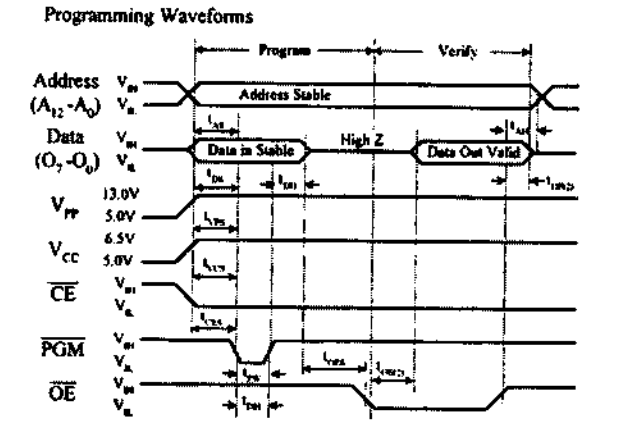


Modes of Operation

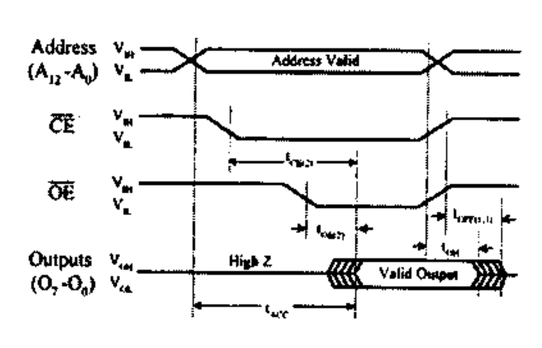
Operation Mode	$\overline{CE}$	$\overline{OE}$	$\overline{PGM}$	V_{PP}	A_9	O_0 - O_7
Read	V_{IL}	V_{IL}	V_{IH}	V_{CC}	X	D_{OUT}
Program	V_{IL}	V_{IH}	V_{IL}	V_H	X	D_{IN}
Program Verify	V_{IL}	V_{IL}	V_{IH}	V_H	X	D_{OUT}
Program inhibit	V_{IH}	X	X	V_H	X	High Z
Standby	V_{IH}	X	X	V_{CC}	X	High Z
Output Disable	V_{IL}	V_{IH}	V_{IH}	V_{CC}	X	High Z
Identify	V_{IL}	V_{IL}	V_{IH}	V_{CC}	V_H	Identity Code

V_{IH} = Logic "1" input voltage (2.0V to V_{CC} + 1V)
V_{IL} = Logic "0" input voltage (-0.5V to 0.8V)
X = Don't care

Programming Waveforms



Read Waveforms



الشكل (ل.5): الذاكرة 27LV64 وأنماط عملها.

يبيِّن الشكل (ل.5) جدولاً بأنماط العمل المختلفة للذاكرة 27LV64، إضافة إلى مخطط التوقيت للكتابة (البرمجة) وللقراءة. قبل أن تتم برمجة الذاكرة يجب وضع الذاكرة في نمط البرمجة ويجب وصل V_{CC} إلى جهد التغذية المناسب وتوصل (V_{PP}) إلى جهد عالٍ مناسب (V_H) وكذلك توضع الرجل ($\overline{CE}$) في حالة Low أما ($\overline{OE}$) فيوضع في حالة high وكذلك يوضع ($\overline{PGM}$) في حالة (Low). تكون محتويات الخلايا الذاكرية في الحالة الأولية كلها واحدات (1 s) وعند برمجة الذاكرة يجب تبديل محتويات بعض المواقع من واحدات (1 s) إلى أصفار (0s). تتم البرمجة بتطبيق معطيات العنوان على الخطوط (A_0 - A_{12}) وتطبق المعطيات التي سيتم تخزينها على خطوط الخرج (O_0 - O_7)، وعندما تكون المعطيات والعنوان مستقرة، يبرمج الموقع الذاكري بتطبيق ($\overline{PGM}$). بعد الانتهاء من برمجة الذاكرة يجب التأكد من صحة البرمجة ويتم ذلك بوضع الذاكرة في نمط التحقق (verify mode) ويصبح هذا النمط فعالاً بوضع V_{CC} على قيمة مناسبة، V_{PP} على مستوى V_H مناسب، ($\overline{CE}$) و ($\overline{OE}$) على حالة Low، أما ($\overline{PGM}$) فيجب أن يكون high.

تتم قراءة المعطيات من الذاكرة بوضع ($\overline{CE}$) في حالة Low لتمكين الشريحة، ويوضع ($\overline{OE}$) أيضاً في حالة Low لتمكين خطوط الخرج، وكي تكون القراءة صحيحة يجب أن تكون الحالات المنطقية لخطوط العناوين مستقرة خلال زمن يسمى زمن ولوج العنوان (address access time) (t_{ACC}) ويساوي هذا الزمن (200 ns)، وتوجد بارامترات توقيت أخرى عديدة في مخطط التوقيت، ويمكن معرفة معاني هذه البارامترات من نشرات معطيات microship (الشركة الصانعة) الخاصة بهذه الذاكرة.

للذاكرة 27LV64 أنماط عمل أخرى هي: نمط التوقيف عن العمل، نمط الهوية الذاتية (identitymode)، نمط الانتظار (standby mode) أو النمط الاحتياطي، ونمط عدم تمكين الخرج (output disable mode).

يستخدم نمط التوقيف (inhibit mode) عند برمجة عدة ذواكر موصولة على التوازي بمعطيات مختلفة. أما نمط الهوية الخاصة فيستخدم لمعرفة الجهة الصانعة للذاكرة وكذلك لمعرفة نوع الذاكرة، فعندما يكون A_0 Low يتم توليد عدد مكون من (8-bit) وهذا العدد يحدد هوية الجهة الصانعة، وعندما يكون A_0 high فإنه يتم توليد عدد آخر مكون من 8-bit يحدد نوع الذاكرة، أما نمط الاحتياط (standby mode) فيستخدم لوضع الذاكرة في حالة استراحة حيث ينخفض استهلاك التيار من 20 mA إلى 100 µA.

عند تشغيل الذاكرة بنمط عدم تمكين الخرج تُصبح خطوط الخرج في حالة ممانعة عالية، وهذه الميزة تلغي النزاع على ممر المعطيات في نظم المعالجات الصغريَّة والتي تتشارك فيها عدة أجهزة على ممر واحد.

عند الرغبة في مسح كامل الذاكرة (وضع كافة الخلايا الذاكرية في حالة 1) يتم تعريض نافذة الذاكرة للأشعة فوق البنفسجية ومن أجل ضمان مسح الذاكرة تنصح الجهة الصانعة بوضع نافذة الذاكرة تحت الأشعة فوق البنفسجية لمدة (20) دقيقة على أن يكون طول موجة الأشعة 2537 A° وشدته 12000 µW/Cm².

الذاكرة 28LV64A

ذاكرة 28LV64A هي ذاكرة 64 K EEPROM وهي منظمة كذاكرة 8 K × 8 bit words وهي من إنتاج شركة Microchip نوع CMOS منخفضة الجهد. لهذه الذاكرة أربعة أنماط عمل هي نمط القراءة، الاحتياط، توقيف الكتابة (write inhibit)، ونمط كتابة بايت (byte write) كما هو موضح في الجدول المبيَّن في الشكل التالي. ونتعرف فيما يلي على أنماط العمل هذه.

نمط القراءة

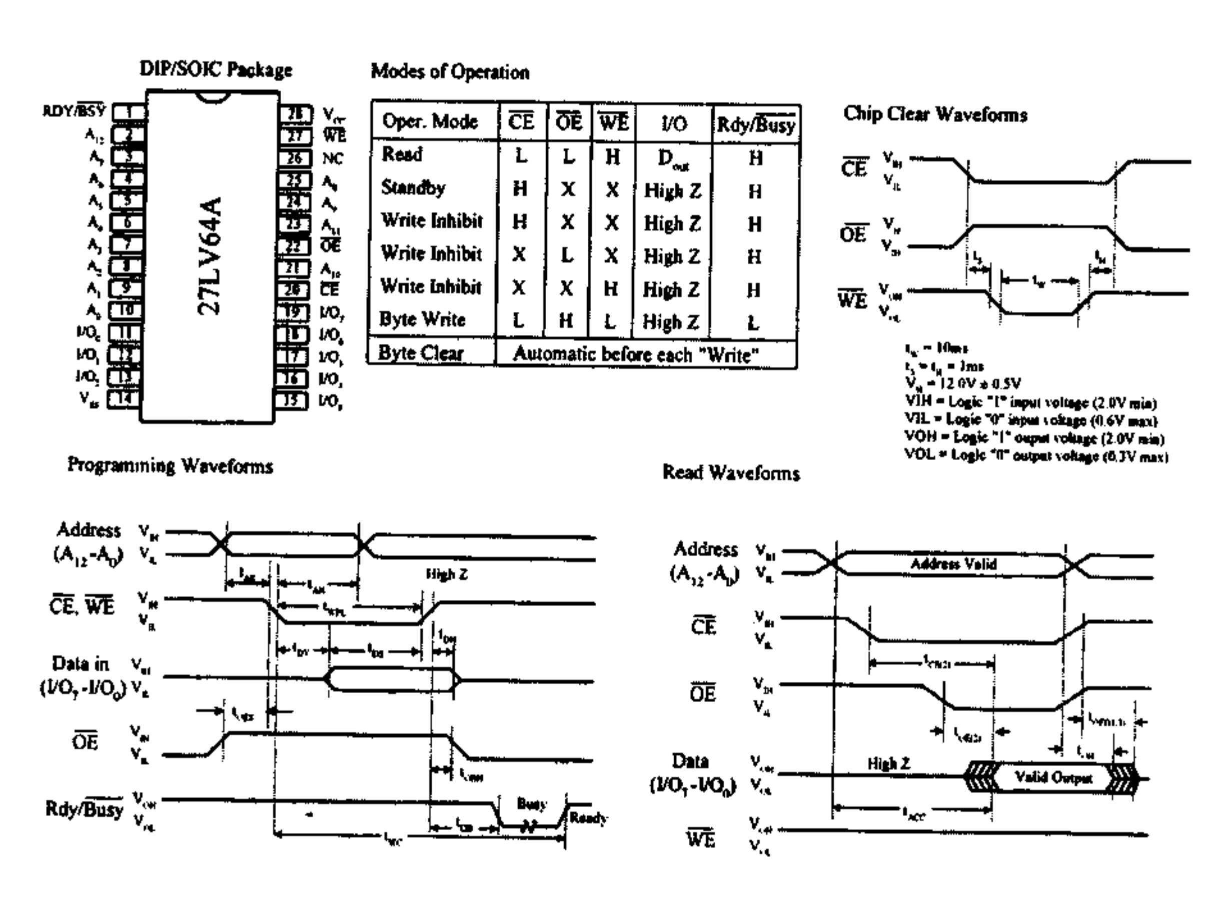
يوجد تابعان منطقيان يجب تحقيقهما كي يتم الحصول على معطيات من خطوط الدخل/خرج (I/O) للذاكرة EEPROM. يُستخدم مدخل انتخاب الشريحة ($\overline{CE}$)، ويستخدم الطرف ($\overline{OE}$) (التحكم بالخرج) لدفع المعطيات إلى أطراف الخرج بغض النظر عن اختيار الشريحة. بفرض أن المعطيات على خطوط العناوين مستقرة، وأن زمن الولوج (t_{ACC}) مساوٍ للتأخير

من ($\overline{CE}$) إلى الخرج (t_{CE})، فإن المعطيات تصبح جاهزة على الخرج عند زمن t_{OE} بعد الجبهة الهابطة لـ ($\overline{OE}$)، بفرض أن ($\overline{CE}$) كان في حالة Low وأن خطوط العنوان كانت مستقرة لزمن مساوٍ على الأقل لـ ($t_{ACC} - t_{OE}$). انظر مخطط توقيت القراءة المبيِّن في الشكل (ل.6).

نمط الكتابة

تُحفَّز دورة الكتابة بتطبيق نبضة Low على الرجل $\overline{WR}$، ويتم مسك معلومات العنوان على الجبهة الهابطة لـ $\overline{WE}$، وعلى الجبهة الصاعدة لـ $\overline{WE}$ يتم مسك أرجل المعطيات والتحكم ($\overline{CE}$) و($\overline{OE}$) وينتقل الطرف READ/$\overline{BUSY}$ إلى المستوى المنطقي Low ليدل على أن الذاكرة في دورة الكتابة. عندما ينتقل READ/$\overline{BUSY}$ ثانية إلى حالة high تكون الذاكرة قد أكملت الكتابة وتكون جاهزة لتقبل دورة كتابة أخرى.

(انظر مخططات التوقيت المبينة في الشكل ل.6).



Oper. Mode	$\overline{CE}$	$\overline{OE}$	$\overline{WE}$	I/O	Rdy/$\overline{Busy}$
Read	L	L	H	D_{out}	H
Standby	H	X	X	High Z	H
Write Inhibit	H	X	X	High Z	H
Write Inhibit	X	L	X	High Z	H
Write Inhibit	X	X	H	High Z	H
Byte Write	L	H	L	High Z	L
Byte Clear	Automatic before each "Write"				

الشكل (ل.6): الذاكرة 27LV64A وأنماط عملها ومخططات توقيتها.

نمط الاحتياط

يمكن وضع الـ EEPROM في نمط الاحتياط بتطبيق high على ($\overline{CE}$) وفي هذا الوضع تكون خطوط الخرج في حالة ممانعة عالية بغض النظر عن حالة الدخل ($\overline{OE}$).

مسح الشريحة

يتم في هذه الحالة مسح كافة محتويات الذاكرة برفع $\overline{OE}$ إلى (12 V) وبوضع $\overline{WE}$ و$\overline{CE}$ في حالة Low.

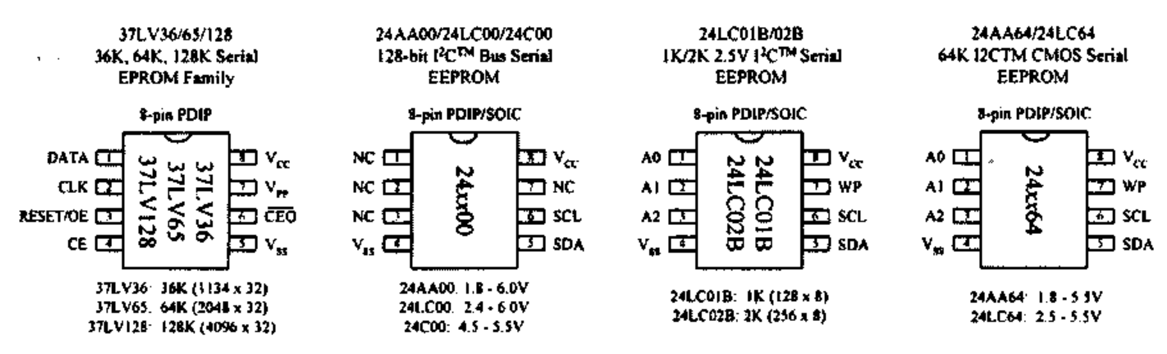
توقيف الكتابة

يستخدم هذا النمط لضمان سلامة المعطيات وخاصة عند الحالات العابرة لارتفاع جهد التغذية أو انخفاضه ويتم توقيف دورة الكتابة بوضع $\overline{WE}$ أو $\overline{CE}$ أو $\overline{OE}$ في حالة Low خلال لحظات وصل التغذية وفصلها.

ذواكر الوصول التسلسلي

تعرفنا حتى الآن على ذواكر وصول (ولوج) تفرعي وتوصل هذه الذواكر مع ممرات المعطيات وممرات العنونة مما يسهل ويسرع عملية ولوج المعالج إلى الذاكرة، وهي سهلة الاستخدام من حيث المبدأ؛ ولكن، وبما أن كل خطوط عنونتها توصل إلى ممر العنونة في منظومة المعالج الصغري، فمن الممكن أن تُدمَّر المعطيات بشكلٍ غير مقصود عندما يعمل المعالج بشكل خاطئ (كأن يقوم بعملية كتابة غير مرغوبة).

يوجد نوع آخر من الذواكر يمكنه حجب الذاكرة عن المعالج، وكذلك تخفيض العدد الكلي للأرجل (الأطراف Pins) باستخدام أسلوب الولوج (الوصول) التسلسلي (serial access) حيث يستخدم وصل تسلسلي لتحريك المعطيات من وإلى الذاكرة والمعالج. ويتطلب هذا الوصل التسلسلي بروتوكولاً دقيقاً لنقل المعطيات وهذا ما يزيل خطر تدمير المعطيات من قبل المعالج. يبيِّن الشكل (J.7) بضعة ذواكر تسلسلية EPROMs وEEPROMs من شركة (Microchip). الرجل SDA الموجودة في ذاكرة EEPROM تعمل كخط ثنائي الاتجاه للمعطيات ويستخدم هذا الخط لنقل المعطيات والعنوان إلى الذاكرة وكذلك لنقل المعطيات من الذاكرة إلى المعالج، أما الرجل SCL فهي طرفية Clock تسلسلي وتستخدم لمزامنة نقل المعطيات من وإلى الذاكرة. توجد مداخل عنونة خاصة A_0، A_1 وA_2 للذواكر 24xx64 و24LC01B/02B وهي ذواكر EEPROMs وتستخدم هذه المداخل من أجل العمل متعدد الذواكر. تستخدم الرجل WP لتمكين العمل العادي للذاكرة (قراءة/كتابة لكامل الذاكرة).



الشكل (J.7): ذواكر وصول تسلسلي نوع EPROM وEEPROM من Microchip.

تتكون المعطيات التسلسلية التي يتم إدخالها إلى الذاكرة من سلسلة من المعلومات وتبدأ هذه السلسلة بخانة بدء (start bit)، ثم تأتي خانات المعطيات وتليها معلومات تحكم خاصة. إن عملية التحكم بالذاكرة التسلسلية تعتبر أمراً صعباً بسبب البروتوكول التسلسلي وتغيُّر البروتوكول من ذاكرة إلى ذاكرة. إذا كنت ترغب في تعلم المزيد عن هذه الذواكر التسلسلية ـــ وربما يتوجب عليك ذلك ـــ لأنها مستخدمة في تطبيقات المتحكمات الصغرية لتخزين البرامج ولمهام أخرى، عليك الرجوع إلى مواقع الشركات الصانعة على شبكة الإنترنت وقراءة نشرات معطيات هذه الذواكر.

J.6 ذواكر الوصول العشوائي

من الضروري استخدام ذاكرة وصول عشوائي RAM في التطبيقات التي تتطلب دورات قراءة وكتابة سريعة وثابتة. (إن الذاكرة القابلة للمسح وإعادة البرمجة مثل ذاكرة EPROM تتحمل حوالي 000 100 دورة قراءة وكتابة ـــ أي تحمُّل محدود لاستمرارية القراءة والكتابة ـــ كما أن زمن القراءة والكتابة فيها عالٍ). تستخدم ذواكر RAM من أجل التخزين المؤقت للمعطيات ولتعليمات البرامج في تطبيقات منظومات المعالجات، إلا أنَّ ذواكر RAM، بعكس ROM، هي ذواكر تطايرية وهذا يعني أنها تفقد المعطيات المخزونة فيها إذا فُصلت التغذية عنها.

J.6.1 ذاكرة RAM الستاتيكية والديناميكية

يوجد نوعان أساسيان من ذواكر RAM: ذواكر RAM الستاتيكية (SRAM)، وذواكر RAM الديناميكية (DRAM). في ذواكر SRAM تخزن المعطيات في خلايا ذاكرية تتكون من قلابات، أما في ذواكر DRAMs فتخزن المعطيات كشحنات في مكثفات مصنعة ضمن المادة نصف الناقلة لشريحة الذاكرة، وإذا كتبت خانة (bit) إلى موقع ذاكري في ذاكرة SRAM، فإن هذه الخانة تبقى في موقعها حتى تتم الكتابة فوقها (أي يتم تخزين bit مخالف مكانها أو حتى تقطع التغذية عن الذاكرة أما في ذواكر DRAMs فإن الخانة المخزنة في موقع ذاكري تختفي خلال زمن لا يتجاوز بضعة ميللي ثانية إذا لم يتم إنعاشها ـــ والإنعاش هو تزويد الموقع الذاكري بشحنات لتعويض الشحنات المتسربة منه.

ويمكن تلخيص الفوارق بشكل عام بين ذواكر SRAM وDRAM بالحجم الكلي للتخزين، واستهلاك الطاقة والسرعة وسهولة الاستخدام. فمن ناحية الحجم يمكن لذواكر DRAMs أن تخزن عدداً أكبر من المعطيات في واحدة المساحة مقارنة مع ذواكر SRAM وذلك لأن السعة (المكثف) في ذواكر DRAMs تحتاج إلى حجم ومساحة أقل على الشريحة مما يحتاجه القلاب (عنصر التخزين في ذاكرة SRAM)، أما من ناحية استهلاك الطاقة فإن ذواكر SRAMs أفضل لأنها لا تحتاج إلى إنعاش، وكذلك تعتبر ذواكر SRAM من ناحية السرعة وسهولة الاستخدام أفضل لأنها لا تحتاج إلى دارات إنعاش. تستخدم ذواكر SRAMs في التطبيقات التي تحتاج إلى ذاكرة صغيرة نسبياً لعمليات القراءة/والكتابة وتتواجد عادة في الشرائح المتكاملة الخاصة بالتطبيقات التي تستهلك قدرة قليلة في نمط العمل الاحتياطي، فهي موجودة مثلاً في الأجهزة المحمولة مثل الحاسبات الصغيرة (حاسبات الجيب)، كما أنها تصنع بشكل متكامل مع المعالج حيث تعمل كـ cache memory تؤمن سرعة تواصل عالية مع المعالج.

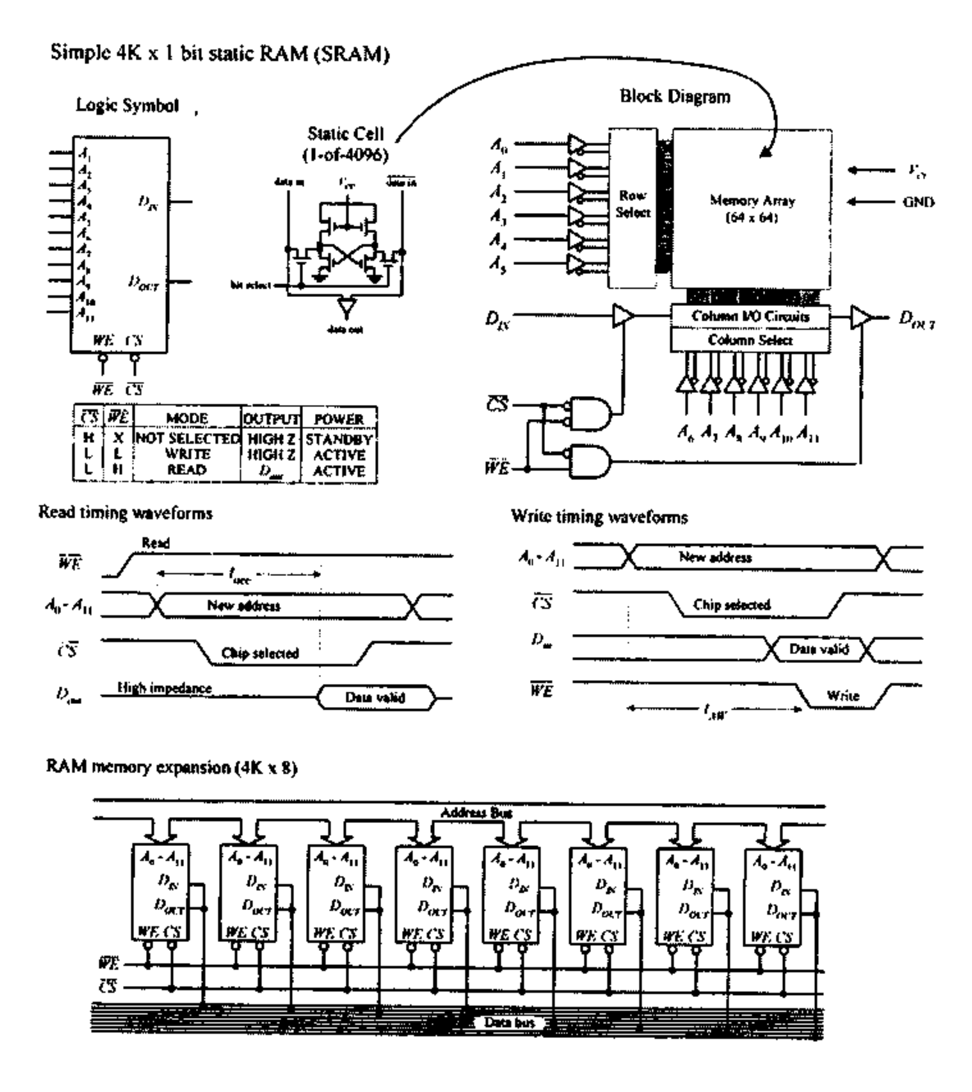
أما ذواكر DRAMs فإنها تستخدم في التطبيقات التي تتطلب ذواكر قراءة/وكتابة كبيرة نسبياً (بمجال الميغا بايت megabyte) كما هي الحال في مودولات الذواكر في الحواسيب. يعتبر التعامل مع الدارات المتكاملة المنفصلة لذواكر RAM سهلاً، في أغلب الحالات، لأنها تكون موضوعة على دارات مطبوعة تشكل مودولات ذواكر توصل مباشرة مع صفوف ذواكر الحاسوب أو تكون مخصصة للعمل مع متحكم صغري، وفي الحالتين ليس من الضروري أن تعرف كيف تستخدم الذاكرة لأن المكونات الصلبة العتادية والناعمة (البرمجيات) هي التي تقوم بمهام العنونة، والإنعاش refreshing وغيرها، ولذلك لن نناقش التفصيلات الدقيقة لذواكر SRAM وDRAM وسوف نأخذ فكرة عن المخططات الصندوقية لهذه الذواكر لعرض مبدأ العمل ثم نأخذ فكرة عن بعض الذواكر، مثل SIMMS وDIMMS المستخدمة في الحواسيب.

J.6.2 ذاكرة SRAM بسيطة جداً

يبيِّن الشكل (J.8) ذاكرة SRAM بدائية جداً وتتكون من مصفوفة 4096 (4K) × 1-bit. تستخدم هذه الذاكرة (12) خط عنونة لعنون (4096) موقع ذاكري مختلف، ويحتوي كل موقع على Flip-Flop (قلاب). مصفوفة الذاكرة مرتبة كمصفوفة (64 × 64) وتحدد الصفوف بواسطة خطوط العنونة (A_0) حتى (A_5) وأما الأعمدة فتحدد بواسطة خطوط العنونة (A_6) حتى (A_{11}) وبذلك يتم تحديد الموقع الذاكري الخاص الذي سيتم التعامل معه. الصندوق المسمى Column Select هو كاشف

من (6) إلى (64) من أجل تحديد عمود مناسب (1) من (64) تتم كتابة خانة معطيات جديدة إلى الذاكرة بتطبيق الخانة على (D_{IN})، ثم توضع خطوط العنونة على الحالات المطلوبة، ويوضع الطرف ($\overline{CS}$) اختيار الشريحة في حالة Low من أجل تمكين الشريحة وكذلك يوضع مدخل تمكين الكتابة ($\overline{WE}$) في حالة Low (لتمكين عازل D_{IN})، وعند الرغبة في قراءة خانة معطيات من الذاكرة يتم أيضاً وضع خطوط العنونة على الحالات المناسبة، ويوضع ($\overline{CS}$) في حالة Low و($\overline{WE}$) في حالة high (لتمكين عازل الخرج (D_{OUT})، انظر مخططات التوقيت في الشكل (ل.8).

يمكن وصل ثماني دارات ذواكر متكاملة 4K × 1 SRAM ICs مع بعضها كما في القسم السفلي من الشكل (ل-8) لتوسيع الذاكرة إلى (4 K × 8) وتصبح الذاكرة الكلية مناسبة للاستخدام في منظومات المعالجات (8-bit). عند تطبيق عنوان على ممر العنونة يتم الولوج إلى نفس الموقع الذاكري في كل ذاكرة (في كل دارة متكاملة لذاكرة) في نفس الوقت، ولذلك تخزن كل خانة من كلمة ثمانية الخانات في مواقع ذاكرية متماثلة (من حيث العنوان) في الدارات المتكاملة للذواكر الثمانية. توجد دارات متكاملة لذواكر SRAM بترتيب أكبر من (n × 1) إذ يمكن أن تكون (n × 4) أو (n × 8)، وكما هي الحال في ذواكر (n × 1) فإن هذه الذواكر يمكن توسيعها (فيمكن وصل ذاكرتين من نوع n × 8 لتشكيل ذاكرة n × 16، ويمكن كذلك وصل أربع ذواكر n × 8 لتشكيل ذاكرة n × 32، وتسمى الذاكرة المشكلة وفق هذه الطريقة باسم الذاكرة الموسعة expanded memory).



$\overline{CS}$	$\overline{WE}$	MODE	OUTPUT	POWER
H	X	NOT SELECTED	HIGH Z	STANDBY
L	L	WRITE	HIGH Z	ACTIVE
L	H	READ	D_{out}	ACTIVE

الشكل (ل.8): ذاكرة 4 K × 1 bit SRAM بسيطة.

3.6.J ملاحظة عن ذواكر SRAMs غير التطايرية

يستحسن في الكثير من التطبيقات استخدام ذاكرة تجمع ميزات السرعة العالية وتحمُّل عمليات ولوج قراءة/وكتابة لعدد كبير جداً من المرات كما هي الحال في ذواكر SRAM وتملك أيضاً خاصية الاحتفاظ بالمعطيات (أي أن لا تكون تطايرية) كما في ذواكر ROM، ولتحقيق هذه الميزات مجتمعة قامت الشركات الصانعة بإنتاج ذواكر SRAMs غير تطايرية (non volatile). وتتكون ذواكر هذا النوع من ذاكرة CMOS SRAM مع بطارية ليثيوم (Lithium battery) ودارة تحسس بالطاقة، فعندما تفصل التغذية عن الذاكرة تعمل البطارية آلياً على تغذية القلابات (Flip-Flops) بجهد كاف يحافظ على وضعيالها (أي يحافظ على البيانات المخزونة فيها، ولكن زمن الاحتفاظ بالمعطيات عند العمل من البطارية يبقى محدودا بزمن حياة البطارية (والزمن المتوقع لحياة بطاريات الليثيوم هو (10) سنوات). هناك نوع آخر من ذواكر SRAM غير التطايرية وبدون بطارية احتياطية يسمى NOV RAM (novolatile RAM) وتحوي هذه الذواكر على ذاكرة EPROM احتياطية بدلاً من البطاريّة وذاكرة الـــ EPROM موصولة على التوازي مع ذاكرة RAM العاديّة.

تتم عمليات القراءة والكتابة من وإلى ذاكرة SRAM في حالات العمل الطبيعية بصورة عادية تماماً، وعندما ينخفض الجهد أثناء العمل تقوم دارة تحسس آلية بإنجاز عملية نسخ لكافة معطيات ذاكرة SRAM التطايرية وتسجلها في ذاكرة EEPROM غير التطايرية، وعند عودة التغذية إلى وضعها الطبيعية تستعيد ذاكرة SRAM المعطيات مجدداً من ذاكرة EEPROM.

تمتاز ذواكر NOV RAMS بإمكانية القراءة والكتابة لعدد غير محدود من المرات تماماً مثل ذاكرة SRAM ولكن عدد مرات التخزين في ذاكرة EEPROM يتحدد بحوالي (10000) عشرة آلاف مرة.

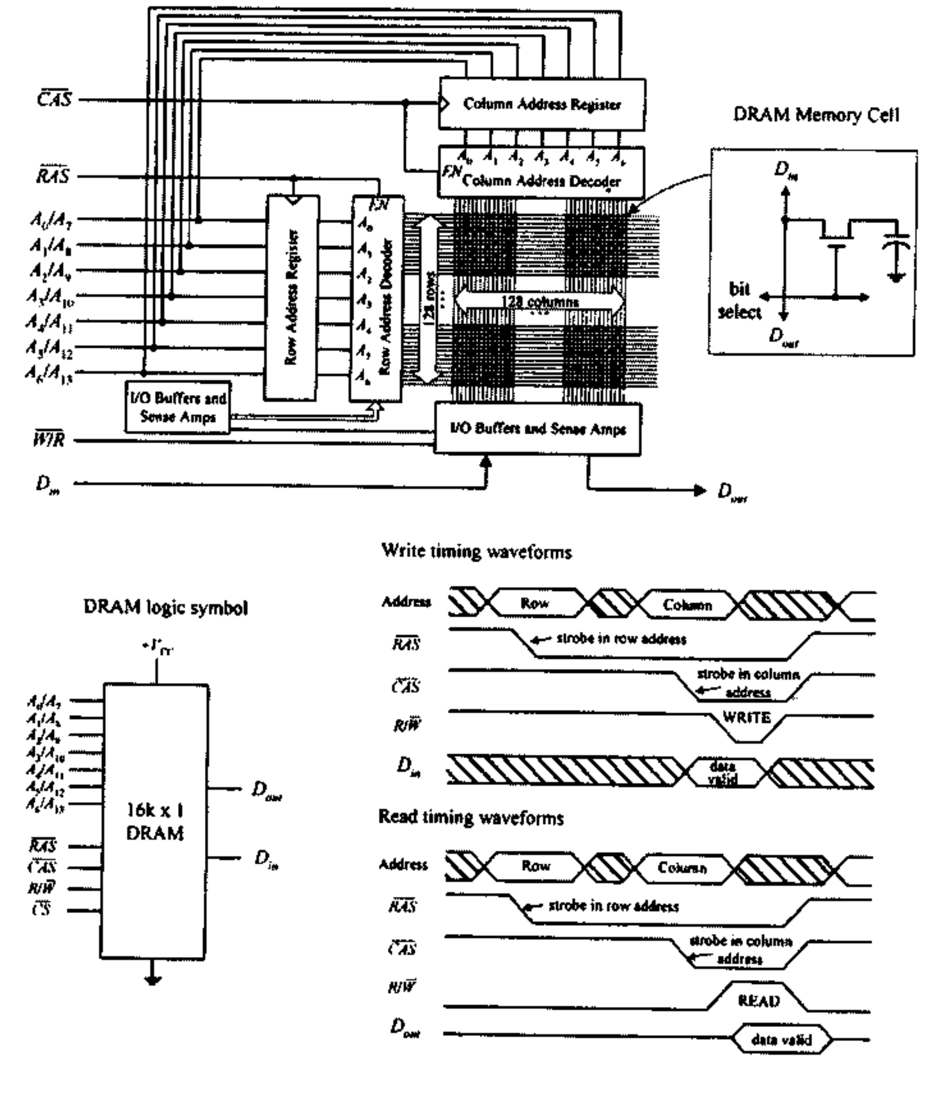
4.6.J ذاكرة الوصول العشوائي الديناميكية DRAM

يبيِّن الشكل (9.J) ذاكرة RAM ديناميكية بسيطة جداً (16 K × 1) ويحتاج الولوج إلى كافة المواقع الذاكرية (16384 موقعاً) لـــ (14) خط عنونة، ولكن في هذه الذاكرة (وفي كافة ذواكر DRAM ذات الدرجة العالية) يتم تخفيض عدد خطوط العنونة إلى النصف باستخدام طريقة الانتخاب (multiplexing). إن عملية عنونة مواقع ذاكرية في هذه الذواكر هي عملية من مرحلتين. في البداية يُطبق عنوان مكون من (7) خانات على خطوط العنونة (A_0 - A_6) ثم يوضع الخط $\overline{RAS}$ (Row Address Strobe).

خط تبويب عنوان السطر (الصف) على حالة Low، ثم تطبق سبع خانات عنوان للأعمدة على الخطوط (A_6 - A_0) وبعد ذلك يوضع خط تبويب عنوان الأعمدة ($\overline{AS}$) على حالة Low وعندها يتم مسك عنوان الموقع ويمكن القراءة منه أو الكتابة إليه باستخدام المدخل ($\overline{WE}$)، فعندما يكون هذا المدخل في حالة Low تكتب المعطيات إلى الذاكرة عبر (D_{in}) وإذا كان high تقرأ المعطيات من الموقع عبر (D_{out}). انظر مخطط التوقيت في الشكل (9.J).

تحتاج ذواكر DRAMs البسيطة، كهذه الذاكرة، إلى إنعاش كل (2 ms) لإنعاش الشحنة الداخلية للمكثفات، وفي ذاكرتنا البسيطة هناك ثلاث طرق لإنعاش الخلايا، إما باستخدام دورة قراءة (Read Cycle) أو باستخدام دورة كتابة (Write Cycle) أو باستخدام دورة $\overline{RAS}$ فقط. إذا لم تكن لديك تعليمات قراءة أو كتابة من أو إلى كل الـــ (128) سطراً كل (2 ms) فإن الطريقة الأخيرة، دورة $\overline{RAS}$، هي المفضلة ولإنجاز ذلك يوضع الخط ($\overline{CAS}$) في حالة high، وتوضع خطوط العنونة (A_0 - A_6) على الوضع (000 0000)، وتُطبق نبضة Low على $\overline{RAS}$ فيزداد عنوان السطر بمقدار (1) وتتكرر آخر خطوتين حتى يتم الولوج إلى الـــ (128) سطراً. وكما تلاحظ فإن عملية إنعاش الذاكرة تحتاج إلى دقة، ولذلك تقوم الجهات الصانعة بإنتاج متحكمات بذواكر RAM الديناميكية أو تضع دارة إنعاش آلية ضمن الدارة المتكاملة للذاكرة، ويمكن القول باختصار أن ذواكر DRAMs المتوفرة هذه الأيام تحوي ضمن دارالها المتكاملة على كل ما يلزم لإنجاز عملية الإنعاش آلياً ولذلك تبدو ذاكرة DRAM للمستخدم كما لو ألها SRAM.

تتغير تقنية DRAM بسرعة فائقة، وتتوفر هذه الأيام ذواكر تشبه ذواكر DRAMs ولها التسميات EDODRAM، ECCDRAM، SDRAM، SDRAMII، RDRAM وSLDRAM، وغيرها وسوف نناقش هذه التقنيات لاحقاً.



الشكل (ل.9): ذاكرة DRAM 16 K × 1.

ل.5.6 ذاكرة الحاسوب

إن ذواكر RAM إما أن تكون بشكل دارة متكاملة، أو تتوفر على شكل مودول ذواكر SIMM (Single in line memory modules) أو مودول ذواكر DIMM (dual in line memory modules) والتي يتم تركيبها في مآخذ صفوف ذواكر الحاسوب. وفي الحالتين لا تحتاج إلى تفكير عميق عن كيفية استخدام الذاكرة ــ إلا إذا كنت تقوم بتصميم الحاسوب بنفسك ــ والشيء الذي عليك تحديده هذه الأيام هو فقط نوع ذاكرة RAM التي ترغب بشرائها لحاسوبك.

تستخدم ذواكر RAM في الحاسوب من أجل التخزين المؤقت للتعليمات والمعطيات اللازمة لإتمام المهام، وهذا يسمح لوحدة المعالجة المركزية في الحاسوب بالولوج إلى التعليمات والمعطيات المخزونة في الذاكرة بشكل سريع جداً. فمثلا عندما تقوم وحدة المعالجة المركزية CPU بتحميل تطبيق كمعالج النصوص (Word Processor) إلى الذاكرة، فإن وحدة المعالجة المركزية تستطيع إيجاد ما تحتاجه بسرعة بدلاً من أن يكون عليها البحث عن الخانات (bits) والمعطيات في القرص الصلب أو في قرص خارجي، ولكي تكون ذاكرة RAM سريعة يجب أن تكون على تواصل (تخاطب) مباشر مع وحدة

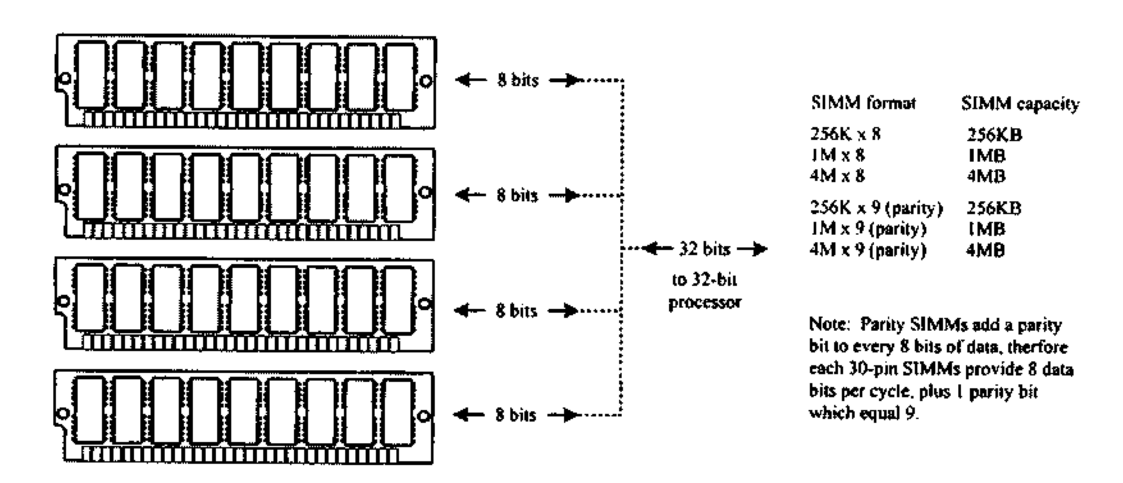
المعالجة المركزية. كانت ذواكر RAM سابقاً تثبت على لوحة النظام للحاسوب (اللوحة الأم motherboard)، ولكن ومع التطور زادت متطلبات الذاكرة وأصبح تثبيت الذواكر على اللوحة الأم غير عملي. تحوي الحواسيب المتوفرة هذه الأيام على مقابس توسيع (expansion slots) مرتبة بجوار بعضها على اللوحة الأم. يتعلق عدد مقابس التوسيع وترتيبها بوحدة المعالجة المركزية في الحاسوب وبكيفية استقبالها للمعلومات.

تستخدم أغلب الحواسيب هذه الأيام ذواكر SIMM أو DIMM وكلا النوعين هو دارات متكاملة لذواكر RAM ديناميكيَّة. يشبه مودول SIMM أو DIMM دارة مطبوعة تحوي على سطحها عدداً من دارات RAM المتكاملة الموسعة على الدارة المطبوعة لتأمين العرض البتي (bit-width) المناسب لوحدة المعالجة المركزية CPU التي تتعامل مع مودول الذاكرة.

يتم تركيب مودول الذاكرة SIMM أو DIMM بإدخاله إلى أحد مقابس الذواكر الموجودة على اللوحة الأم. تستخدم الحواسيب المتوفرة هذه الأيام ذواكر DIMMs لها (168) رجلاً، أما حواسيب 486 وبينتيوم Pentium القديمة فقد كانت تستخدم ذواكر SIMMs بـ (72) رجلاً في حين كانت الطرازات القديمة من الحواسيب تستخدم ذواكر SIMMs بـ (30) رجلاً.

ذواكر SIMMs بـ (30) رجلاً

يبيِّن الشكل (ل.10) مثالاً عن كيفية استخدام ذواكر SIMMs ذات الـ (30) رجلاً مع معالجات 32 bit. تؤمن كل SIMM 8-bits، ولذلك يجب استخدام أربع ذواكر SIMM لتأمين الـ 32-bit اللازمة لوحدة المعالجة المركزية. ينقسم ترتيب الذاكرة في تلك النظم إلى صفي ذواكر الصف رقم صفر والصف رقم واحد. يتكون كل صف من أربعة مقابس لمودولات ذواكر SIMM ذات (30) رجلاً. تعنون وحدة المعالجة المركزية أحد صفوف الذواكر في وقت ما. إن الحجوم النموذجية لذواكر SIMMs ذات الـ (30) رجلاً هي (256 KB) 256 K × 8، (1 MB) 1 M × 8، (4 MB) 4 M × 8. يوجد نوع آخر من ذواكر SIMM تسمى ذواكر التكافؤ Parity SIMM-SIMM ـــ وتضيف هذه الذواكر خانة تكافؤ لكل 8-bit من المعطيات وتستخدم خانات التكافؤ من أجل كشف الأخطاء، وسوف نتحدث عن التكافؤ بتفصيل أكثر بعد قليل.



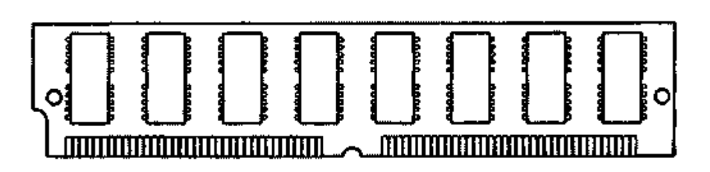
الشكل (ل.10): ذواكر SIMM بـ (30) رجل.

يُنصح، وفي أغلب الحواسيب بتجنب المزج بين ذواكر SIMMs مختلفة السعات، وإذا حدث مثل هذا المزج فإن الحاسوب لن يقلع أو أنه لن يميز بعض صفوف الذواكر. فإذا كان أحد صفوف الذواكر مكوناً من ثلاث ذواكر 1 MB SIMMs وذاكرة 4 MB SIMM، فربما يميزها الحاسوب كذاكرة 1 MB SIMM واحدة.

ذواكر SIMMs بـ 72 رجلاً

إن ذواكر SIMMs ذات الـ (72) رجلاً هي تحسين لذواكر SIM ذات الـ (30) رجلاً. تؤمن كل ذاكرة SIMM بـ (72) رجلاً 32-bit من المعطيات وهذا يساوي أربع أضعاف خانات المعطيات التي تؤمنها ذاكرة 30 Pin-SIMM، فإذا كانت لديك وحدة معالجة مركزية 32-bit كالمعالج Intel 386 أو Motorla 68040 فإنك تحتاج فقط لذاكرة واحدة 72 Pin-SIMM في كل صف.

يبيِّن الشكل (ل.11) الحجوم المعيارية لذواكر SIMM. لاحظ أن ذواكر التكافؤ SIMMs تستخدم الحجم (36 × n) والخانات الإضافية الأربع هي خانات تكافؤ. خانة واحدة لكل 8 bits من الـ 32-bit.



SIMM format	SIMM capacity
256K x 32	1MB (or 8M)
1M x 32	4MB
2M x 32	8MB
4M x 32	16MB
8M x 32	32MB
256K x 36 (parity)	1MB
1M x 36 (parity)	4MB
2M x 36 (parity)	8MB
4M x 36 (parity)	16MB
8M x 36 (parity)	32MB

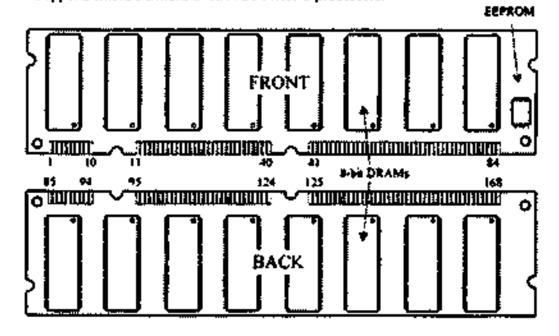
الشكل (ل.11): ذاكرة 72-Pin SIMM

ذواكر 168-Pin DIMMs

تتوضع الدارات المتكاملة للذواكر على وجهي الدارة المطبوعة لمودول الذاكرة، وهي تشبه كثيراً مودولات ذواكر SIMM التي تتوضع فيها الدارات المتكاملة للذواكر على وجه واحد من الدارة المطبوعة.

إن خطوط الوصل المتقابلة على الوجهين تكون موصولة مع بعضها لتشكل تماساً كهربائياً واحداً في مودولات ذواكر SIMMs، أما في مودولات ذواكر DIMMs فإن الخطوط المتقابلة والمخصصة للوصل مع المقبس تبقى معزولة عن بعضها وتشكل تماسين منفصلين. تستخدم مودولات ذواكر DIMM في الحواسيب التي تستخدم ممرات ذاكرة بعرض 64-bit وتكون هذه الحواسيب في أغلب الحالات عاملة على معالج 64-bit مثل معالج بنتيومٍ أو معالج IBM. يبيِّن الشكل (ل.12) ذاكرة 16 M × 64-bit DRAM وهي من نوع مودول DIMM معياري بـ 168 رجلاً.

16M x 64 bit synchronous DRAM module
Includes 16 DRAMs on a printed circuit board (pipeline architecture) with 168-pin DIMM package.
Supports Intel's Pentium or IBM's PowerPC processors.



A0 to A11	Address Inputs
BA0, 1	Bank Select
DQ0 to DQ63	Data Inputs/Outputs
/CS0 to 3	Chip Select
/RAS	Row Address Strobe
/CAS	Column Address Strobe
/WE	Write Enable
DQMB0 to 7	Output Disable/Write Mask
CLK0 to 3	Clock input
CKE0, 1	Clock enable
SDA	Serial Data/Address for PD
SCL	Clock for PD
SA0 to 2	Address for PD
VDD	Power (+3.3V)
VSS	Ground
NC	No Connection

الشكل (ل.12): مودول ذاكرة، DIMM.

6.6.ل اختبار سلامة معطيات الذاكرة

هناك طريقتان للتأكد من سلامة المعطيات المخزونة في الذاكرة، إحدى هاتين الطريقتين تعتمد على اختبار التكافؤ، والطريقة الثانية هي طريقة تصحيح الخطأ (Error Correction Code ECC) وتعتبر طريقة اختبار التكافؤ هي الأكثر استخداما ويتم فيها إضافة خانة إضافية إلى كل ثمانية بتات 8-bits كما هي الحال في مودولات ذواكر (36 × أو 9 × SIMM)، أما طريقة (ECC) فهي طريقة أكثر شمولية في اختبار سلامة معطيات الذاكرة، ويمكن لهذه الطريقة كشف وتصحيح خطأ (bit) واحد، ولكن هذه الطريقة مكلفة لذلك لا تستخدم للحفاظ على انخفاض أسعار الحواسيب. تصمم أغلب الحواسيب العادية لدعم طريقة التكافؤ في التأكد من سلامة معطيات الذاكرة، أما الحواسيب التي تصمم للعمل كمخدمات (Servers) فإنها تدعم طريقة (ECC).

7.6.ل تقنية DRAM المستخدمة في ذواكر الحواسيب

تدمج عدة تقنيات DRAM في ذواكر الحواسيب هذه الأيام.

فتقنية ذواكر Extended Data Out) EDO) هي تقنية تسمح لوحدة المعالجة المركزية CPU (يجب أن تكون وحدة المعالجة المركزية من النوع الذي يدعم EDO) بالولوج إلى الذاكرة بسرعة تزيد بنسبة (% 10) أو (% 20) عن شرائح DRAM المعياريَّة.

يوجد نوع آخر من ذواكر DRAM وهو ذواكر DRAM المتزامنة SDRAM ويتم في هذه الذواكر استخدام نبضات Clock لمزامنة إدخال المعطيات وإخراجها إلى ومن الذاكرة ويكون هناك تناسق بين نبضات Clock التي تستخدم لمزامنة الذاكرة ونبضات Clock لوحدة المعالجة المركزية بحيث يكون هناك تزامن في التوقيت بين وحدة المعالجة المركزية والذاكرة. تساهم ذواكر DRAMs في توفير الوقت عند تنفيذ الأوامر ونقل المعطيات وبذلك فإنها تحسن سرعة الأداء العام للجهاز (جهاز الحاسوب). يستطيع المعالج أو وحدة المعالجة المركزية CPU الولوج إلى ذواكر SDRAMs بسرعة تزيد بنسبة % 25 بالمقارنة مع ذواكر EDO. تعتبر ذواكر DDR أو double-data-rate SRAM) SDRAMII) هي أسرع أنواع ذواكر SDRAM ويتم فيها قراءة المعطيات على الجبهة الصاعدة والهابطة لنبضة Clock وبذلك يتضاعف معدَّل قراءة المعطيات لشريحة الذاكرة. إن ذواكر RDRAM هي ذواكر تقنية عالية السرعة ومن نوع ذواكر DRAM وتستخدم قناة ذات عرض حزمة عالٍ لنقل المعطيات بسرعة تصل إلى (10) أضعاف سرعة النقل لذواكر DRAM المعيارية.



المعالجات والمتحكمات الصغرية

يوجد تقريباً في كل جهاز إلكتروني معقد تجده هذه الأيام معالج صغري أو متحكم صغري يقود عمل الجهاز، وفي هذه الأجهزة الإلكترونية لا تجد دارات متكاملة رقمية Logic ICs لبوابات بسيطة أو لقلابات أو عدادات أو مسجلات إزاحة وغيرها من الدارات الرقمية التي درسناها سابقاً في هذا الكتاب وقد يبدو الأمر محبطاً لك بعض الشيء إذ نتساءل لماذا درسناها إذاً؟.

عند كتابة وإعداد مرجع إلكتروني موجه للمبتدئين يكون من الضروري دراسة بعض الأدوات والعناصر والتقنيات التي لم تعد مستخدمة بحد ذاتها في التجهيزات الإلكترونية الحديثة من أجل توضيح بعض المبادئ الهامة.

والمثال الدقيق على ذلك هو البوابات المنطقية والقلابات، فهذه العناصر المنطقية من النادر وجودها واستخدامها بمفردها هذه الأيام ولكنها توفر للقارئ إمكانية فهم الحالات المنطقية والعمليات المنطقية والذواكر.

ومن أجل شرح مبادئ أكثر تعقيداً كمبدأ العد تلاحظ استخدام العناصر المذكورة سابقاً كالقلابات والبوابات، ومن ذلك يتبيّن أن ما درسناه من عناصر وأدوات منطقية يشكل حجر الأساس في بناء أدوات أكثر تطوراً ولذلك لا يجب النظر إلى العناصر والمكونات المنطقية البسيطة مثل البوابات والقلابات وغيرها على أنها الهدف الذي سوف نعتمد عليه في بناء وتصميم أجهزة إلكترونية وخاصة إذا نظرنا إلى المستوى التقني للأدوات والعناصر الجاهزة والمتوفرة هذه الأيام فليس من الحكمة مثلاً أن نقوم بتصميم دارة انتخاب (multiplexer) باستخدام بوابات بسيطة أو أن نقوم مثلاً بتصميم عداد باستخدام قلابات أو أن نقوم بتصميم مبدل تشابهي رقمي أو رقمي تشابهي باستخدام مقاومات ومضخمات عمليات ومفاتيح لأنه وببساطة تتوفر دارات متكاملة جاهزة للاستخدام كنواخب أو عدادات أو مبدلات A/D أو D/A. وما يجب أن نركز عليه فعلياً هو المتحكم الصغري (microcontroller)، فالمتحكم الصغري هو حقاً أحد أهم الإنجازات في مجال الإلكترونيات الحديثة، لأنه يمكن أن يحل محل دارات منطقية كاملة مكونة من عناصر منطقية ودارات متكاملة منطقية عديدة.

يحتوي المتحكم الصغري على وحدة معالجة مركزية CPU (Central Processing Unit) تنجز نفس المهام الأساسية التي ينجزها المعالج الصغري (microprocessor) لجهاز الحاسوب كالعمليات المنطقية وعمليات التحكم بالمداخل والمخارج I/O وغيرها. يحتوي المتحكم الصغري على مكونات أخرى غير وحدة المعالجة المركزية مثل ذواكر ROM وRAM، ومنافذ الاتصال التسلسلي (Serial Communication Ports) وغالباً ما يحتوي أيضاً مبدلات A/D وغيرها. يمكن اعتبار المتحكم الصغري من حيث الجوهر حاسوباً صغيراً بدون لوحة مفاتيح وشاشة مراقبة (مرقاب monitor). يمكن باستخدام متحكم صغري واحد بناء دارة تحكم بإنسان آلي (robot) قادر على إنجاز وظائف متعددة. ويمكن استخدام المتحكمات الصغرية في تطبيقات عديدة كالتحكم بمحركات السيرفو، وتوليد الأصوات، ومراقبة حساسات الأشعة تحت الحمراء، وتسجيل معطيات

الدخل التي يتم توليدها بواسطة مبدلات طاقة تشابهية (analog transducers) وغيرها من التطبيقات. تستخدم المتحكمات الصغرية في أفران المايكروويف، وفي أجهزة التلفزيون وفي أجهزة الفيديو، وفي الأجهزة المحيطية للحواسيب كالطابعات الليزرية وسواقات الأقراص،كما تستخدم أيضاً في أنظمة التحكم بالسيارات وفي نظم الأمن (Security systems)، وفي الألعاب (toys)، وفي أجهزة قياس المعطيات البيئية وتسجيلها، وفي الهواتف الخلوية وفي أي جهاز يتطلب تحكماً برمجياً.

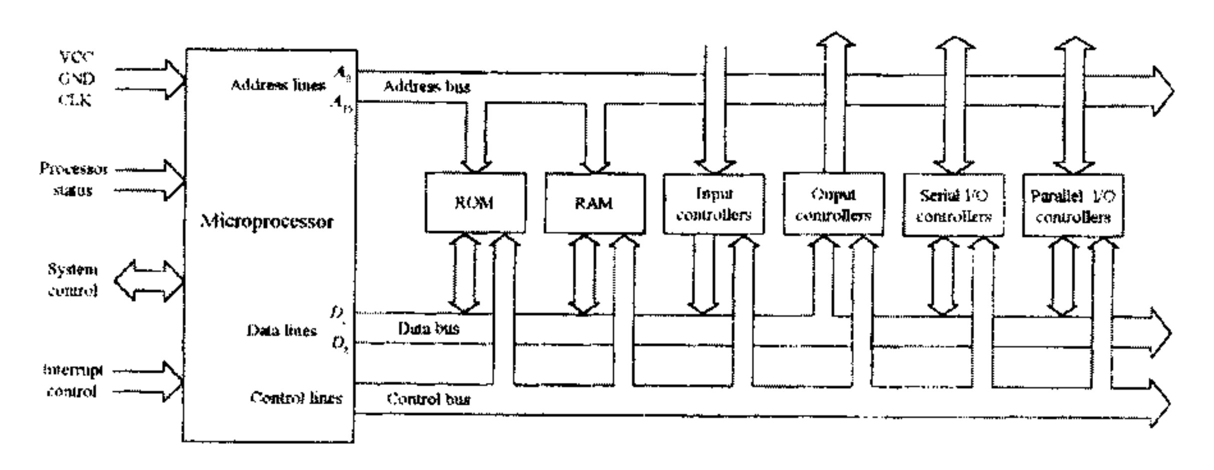
إن المعالجات الصغرية (microprocessors) كمعالجات Pentium (من إنتاج شركة Intel) شبيهة بالمتحكمات الصغرية، ولكنها مصممة بشكل أساسي لمعالجة البيانات العددية بسرعة، وهذا الشيء ضروري من أجل تشغيل برامج الوسائط المتعددة المعقدة. يحتاج المعالج الصغري إلى عدد كبير من العناصر الإضافية الداعمة مثل ذواكر ROM وRAM والمتحكمات بالدخل والخرج I/O وغيرها ــ وهذه الأشياء تكون كلها موجودة على شريحة المتحكم الصغري. لذلك سنقوم وباختصار بالتعرف على المعالج الصغري في هذا الملحق وسوف نركز بشكلٍ أساسي على المتحكم الصغري.

تعتبر المتحكمات الصغرية الشغل الشاغل لأغلب العاملين في مجال الإلكترونيات هذه الأيام ويعود ذلك إلى سهولة استخدامها، ويمكن استخدامها كأدمغة في العديد من الأجهزة الإلكترونية التي تغذى من البطاريات، أما المعالجات الصغرية فإنها تستخدم على الأغلب في الحواسيب وليس لها استخدام عملي مباشر بالنسبة للمبتكرين الذين يرغبون التعامل مع الدارات المتكاملة ICs بهدف بناء دارات وأجهزة إلكترونية اعتماداً عليها.

1.K مقدمة إلى المعالجات الصغرية

المعالجات الصغرية هي دارات متكاملة لها خطوط عنونة، وخطوط معطيات، وخطوط تحكم (Control Lines)، وتملك القدرة على قراءة وتنفيذ التعليمات (instructions) من ذاكرة قراءة خارجية ROM، وتحتفظ بالمعطيات المؤقتة وبالبرامج في ذاكرة وصول عشوائي RAM خارجيَّة عن طريق القراءة والكتابة، وكذلك عن طريق استقبال إشارات دخل وإعطاء إشارات خرج (output signals) لدارات الدعم الخارجي.

يبيِّن الشكل (1.K) نظاماً بسيطاً مرتكزاً على معالج صغري مع دارات الدعم الخارجي.



الشكل (1.K): نظام بسيط لمعالج صغري.

1.1.K المعالج الصغري

إن قلب المنظومة القائمة على المعالج الصغري هو المعالج الصغري ذاته أو وحدة المعالجة المركزية CPU، والمعالج الصغري هو المسؤول عن إنجاز الحسابات باستخدام المعطيات الكثيرة والمنظمة على شكل كلمات (Words). في منظومة المعالج الصغري الخاصة، تتكون وحدة المعالجة الصغرية من معالج 8-bit (معالج يعمل بكلمات 8-bits)، أما في نظم المعالجات الصغرية الأكثر تعقيداً، فإن المعالج يعمل بكلمات ذات طول أكبر، 16-bit، أو 32-bit أو حتى 64-bit كما هي الحال في معالجات Pentium. إن وظيفة المعالج هي قراءة تعليمات البرنامج (program instructions) من الذاكرة وتنفيذ هذه التعليمات عن طريق تزويد الممرات الخارجية الثلاث بالمستويات والتوقيتات المناسبة لجعل الأجهزة الموصولة (الذواكر، وأجهزة التحكم بالدخل والخرج I/O controllers) تنجز أعمالها المحددة. يوجد داخل المعالج الصغري أقسام فرعية متكاملة مصممة لإنجاز مهام خاصة. أحد هذه الأقسام الخاصة هو فاك ترميز التعليمات (instruction decoder) والذي يستقبل ويفسر التعليمات التي يتم إحضارها من الذاكرة ويحدد ما هي الخطوات الواجب تنفيذها اعتماداً على التعليمات المجلوبة. يحتوي المعالج الصغري أيضاً على وحدة الحساب والمنطق (Arithmetic Logic Unit ALU) التي يمكن أن تنجز عمليات وفق تعليمات مثل عمليات الجمع (add)، والمقارنة والإزاحة (shift) والتحريك (move) والمتمم (complement) وغيرها، ويتم إنجاز هذه العمليات على كميات مخزونة في مسجلات الشريحة أو في ذاكرة خارجيَّة. يوجد أيضاً عداد برنامج (program counter) يقوم بملاحقة الموقع الحالي في برنامج التنفيذ، وتوجد أقسام فرعية أخرى عديدة ضمن المعالج الصغري ـــ وسوف نتعرف عن كثب على معالج صغري فعلي بعد قليل.

2.1.K ممر العنونة، ممر المعطيات وممر التحكم

توجد ثلاث ممرات أساسية تستخدم لنقل العناوين (addresses)، والمعطيات (data) ومعلومات التحكم (control information) بين المعالج الصغري والأجهزة الخارجيَّة، كذواكر RAM وROM ومتحكمات الدخل/خرج المختلفة (I/O Controllers). وهذه الممرات هي ممر العنونة، وممر المعطيات، وممر التحكم (تذكر أن الممر هو مجموعة من النواقل التي تتشارك عليها أجهزة مختلفة).

يستخدم ممر العنونة من قِبل المعالج لاختيار موقع ذاكري معيَّن في جهاز خارجي كذاكرة مثلاً. وفي منظومة المعالج البسيطة المبينة في الشكل (1.K) نلاحظ أن عرض ممر العنونة هو (16-bit) وهذا يعني أن المعالج يستطيع الولوج إلى ($2^{16} = 65536$) عنواناً مختلفاً.

أما ممر المعطيات فيستخدم لنقل المعطيات بين المعالج والأجهزة الخارجيَّة (ذواكر، أجهزة محيطية)، وعرض ممر المعطيات لمنظومة المعالج المعطاة في الشكل (1.K) هو 8-bit، أما في المعالجات الأحدث فإن عرض ممر المعطيات يكون أكبر، وهو 16-bit في معالجات الـــ 486 و32-bit في معالجات Pentium.

إن ممر التحكم متغير العرض، ويتعلق ذلك بالمعالج الصغري المستخدم، ويحمل هذا الممر إشارات التحكم التي توضع على الممر من قبل دارات متكاملة أخرى لتحديد ماهية العملية الجاري إنجازها، ومن هذه الإشارات تستطيع الدارات المتكاملة ICs أن تحدِّد فيما إذا كانت العملية هي عملية قراءة (read)، أو كتابة (write)، أو مقاطعة interrupt، أو I/O، أو الولوج إلى ذاكرة، أو عملية من نوع آخر مختلف عن ما تم ذكره.

3.1.K الذاكرة

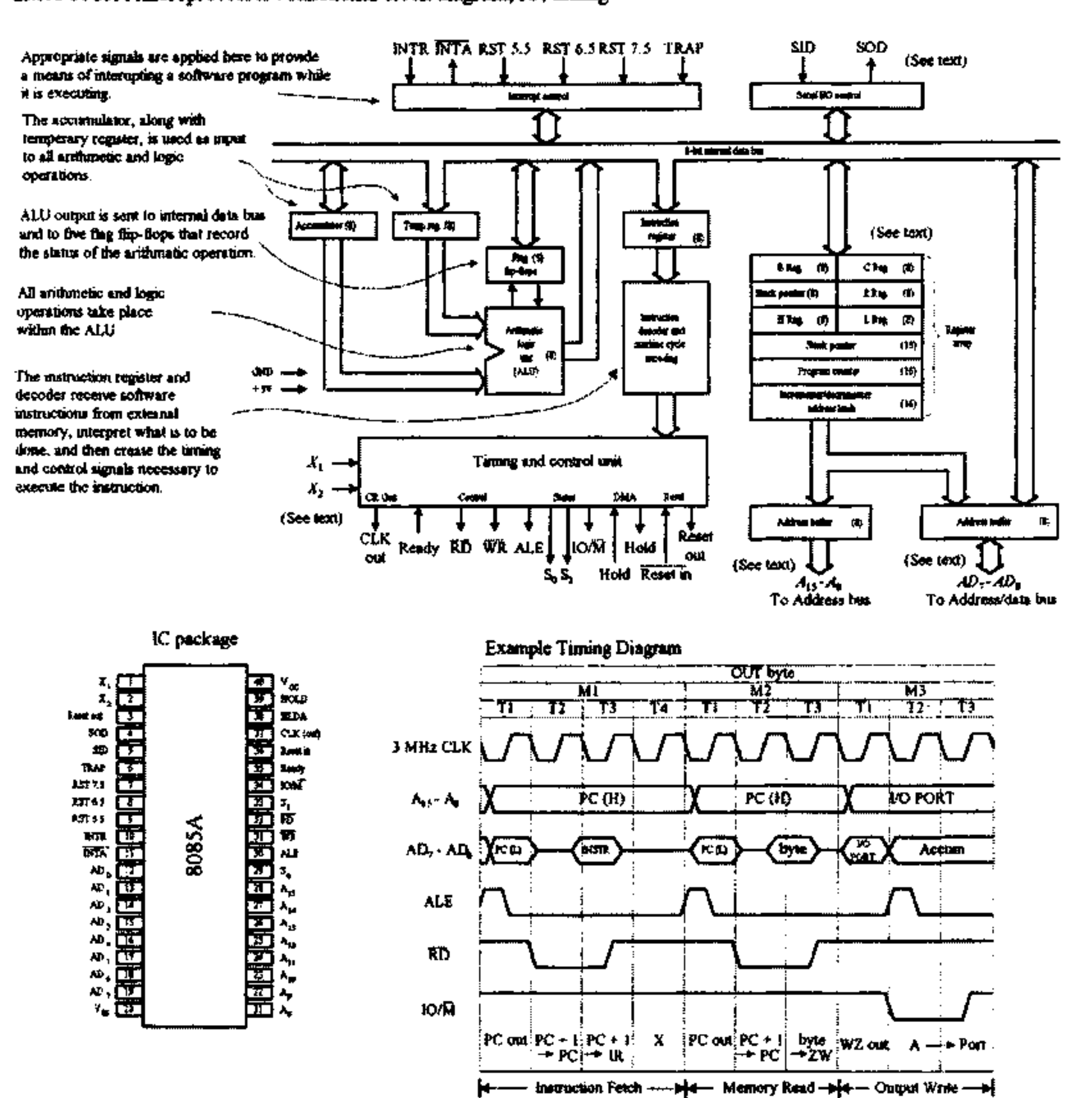
تستخدم الحواسيب ثلاثة أنواع من الذواكر هي ذواكر ROM، ذواكر RAM والذواكر الضخمة (كالأقراص الصلبة، أو الأقراص المرنة، أو الـ CD-ROM أو سواقات ZIP). تعمل ذواكر ROM كذواكر غير تطايرية وتستخدم لتخزين تتابع الإقلاع (تتابع تعليمات الإقلاع) والتي تتضمن توزيع المنافذ، وتهيئة المقاطعة والشيفرات اللازمة لتمكين نظام التشغيل من القراءة من القرص الصلب. تستخدم ذواكر RAM لحفظ المعطيات بشكلٍ مؤقت وكذلك للاحتفاظ المؤقت بالبرامج التي يستخدمها المعالج الصغري. تستخدم وسائط التخزين الكبيرة من أجل التخزين طويل الأمد للمعطيات.

4.1.K متحكمات الدخل والخرج

تستخدم متحكمات دخل وخرج (I/O controllers) خاصة لتمكين المعالج الصغري من استقبال المعطيات من وإرسال المعطيات إلى أنواع مختلفة من أجهزة الدخل والخرج، مثل لوحة المفاتيح (Keyboard)، ووحدة الإظهار (display)، والطابعة (Printer)، وغيرها. يوصل المتحكم إلى نظام الممر (bus system) ويقاد من قبل المعالج الصغري. وكي يحافظ المعالج الصغري على مراقبة أجهزة الدخل والخرج المختلفة، فإن المعالج الصغري يستطيع إما عنونة المتحكم بشكلٍ مباشر باستخدام تعليمات البرنامج، أو يقوم المتحكم بإصدار إشارة مقاطعة (interrupt signal) عندما يقوم الجهاز الخارجي بتوليد إشارة من نوع (read me) — اقرأ الإشارة. توجد كافة أنواع المتحكمات في الحواسيب، اعتباراً من متحكمات الصوت (sound controllers)، ومتحكماتِ SCSI، ومتحكمات الممر التسلسلي العام (universal serial bus controllers)، ومتحكمات الألعاب، ومتحكمات القرص المرن (floppy-disk)، ومتحكمات القرص الصلب (hard-disk controllers) وغيرها. وكل هذه الأشياء تشتريها من البائع أو تكون موجودة في الحاسوب. تختلف إشارات التحكم باختلاف المكونات الجامدة (العتادية) ولذلك تصمم برمجيات خاصة لخلق أداة ربط برمجية موحدة لكل قطعة خاصة من المكونات الجامدة المستخدمة.

5.1.K معالج صغري كعيّنة للدراسة

سوف ندرس المعالج الصغري 8085، لأخذ فكرة أساسية عن البنية الداخلية للمعالجات البسيطة، ومع أن هذا المعالج قديم، إلا أنه يشترك مع المعالجات الحديثة بالعديد من الخصائص الأساسيّة وفهمه سهل جداً، ولذلك سوف نعتبره مثالاً للدراسة.



الشكل (2.K): المخطط الصندوقي للمعالج 8085، ومخطط التوقيت.

وحدة الحساب والمنطق ALU

يحتوي المعالج 8085، كما هي الحال في كل المعالجات، على وحدة حساب ومنطق (ALU) مكونة من بوابات ووظيفتها هي إنجاز عمليات حسابية ومنطقية (+، -، ×، /، OR، AND، NOT، وغيرها) وكذلك عمليات المقارنة (=، >، =>، <، =<) وكذلك إزاحة المعطيات المرسلة إليها من الذاكرة. وتتلقى وحدة الحساب والمنطق دعماً في أعمالها هذه من واحد أو أكثر من مسجلات وحدات الحساب والمنطق (ALU registers)، والتي تسمى المراكمات (accumulators) وتستقبل هذه المراكمات القيم الأولية من الذاكرة وتحتفظ بنتائج العمليات الحسابية والمنطقية وتعيد نتيجة الحساب والعمليات المنطقية إلى الذاكرة. توجد مجموعة من المبينات الثنائية (binary indicators) التي تسمى الأعلام (flags)، وترتبط هذه المبينات بوحدة الحساب والمنطق وتؤمن معلومات تغذية عكسية تحكمية على شكل ملخص بحالات الوحدة ALU بعد كل عملية وتتضمن هذه المعلومات حالة النتيجة، موجبة، أو سالبة، أو صفر، أو لا تساوي الصفر.

وحدة التحكم

إن وحدة التحكم هي عنصر التوجيه في النظام، وهي المسؤولة عن تنفيذ تتابعات البرنامج المخزون، وتنجز هذه المهمة بالمتابعة المتكررة لدورة تنفيذ تعليمة وذلك لكل تعليمة في البرنامج. تقوم هذه الوحدة أولاً بإحضار التعليمة من ذاكرة التخزين الأساسية إلى وحدة تحكم خاصة تسمى مسجل التعليمة (instruction register)، ثم تتم عملية فك ترميز التعليمة فصل التعليمة إلى أجزاء تبيِّن ما الذي يجب فعله (القسم الخاص بالعملية operation part) وما هي المعلومات التي تتضمنها العملية (قسم المعامل operand part)، وبعد ذلك تنفذ التعليمة بإرسال إشارات التحكم المناسبة إلى الـ ALU، وI/O، والذاكرة، وهذا ما يسمى بدورة الإحضار وفك الترميز والتنفيذ (fetch-decode-execute cycle).

المقاطعات

توجد ميزة هامة لنظم المعالجات الصغرية وهي التحكم بالمقاطعة، حيث يمكن للإشارات الرقمية الخارجية مقاطعة البرنامج أثناء سيره، وللمعالج 8085 خمسة مداخل مقاطعة هي: INTR، RST، RST5.5، RST6.5 وRST7.5 وTRAP وهذه المقاطعات مرتبة وفق أفضلية ثابتة وتحدد هذه الأفضلية المقاطعة التي يتم تمييزها أولاً في حال ورود أكثر من إشارة مقاطعة في وقت واحد، وترتيب الأفضليات في المعالج 8085 هو كما يلي: TRAP (أعلى درجة أفضلية)، RST7.5 (الدرجة الثانية في الأفضلية)، RST6.5 (الدرجة الثالثة في الأفضلية)، RST5.5 (الدرجة الرابعة) وأخيراً INTR (الدرجة الخامسة والأخيرة وهي أدنى درجة أفضلية. ويفيد مدخل الأفضلية TRAP لمقاطعة البرنامج عند حدوث أمور خطيرة كانقطاع التغذية، أو حدوث خطأ في الممر.

إشارات العنوان والمعطيات

العنوان العالي (A_{15}-A_8):

وهي خانات العنوان الثمانية ذات الدرجة العليا من الخانات الكلية للعنوان والتي عددها 16 خانة.

عنوان/معطيات Address/Data:

خانات العنوان الثمانية ذات الدرجة المنخفضة من الخانات الكلية الـ 16 للعنوان، أو ثمانية خانات معطيات. يحتاج مخطط العنوان هذا إلى انتخاب (multiplexing)، وتستخدم هذه الميزة لتخفيض عدد الأرجل في المعالج.

معطيات دخل تسلسلية Serial output data (SID):

دخل وحيد الخانة لملاءمة المعالج للتعامل مع الأجهزة التي تقوم بإرسال المعطيات تسلسلياً (خانة بعد خانة).

معطيات خرج تسلسلية Serial output data (SOD):

خرج وحيد الخانة (single-bit output) من أجل ملاءمة المعالج للتعامل مع الأجهزة التي تستقبل تسلسلياً.

إشارات التحكم والتوقيت *Timing and control signals*

CLK (pout): خرج Clock من منظومة المعالج، يُرسل إلى الشرائح (chips) المحيطية من أجل مزامنة عملها.

X_1، X_2: أطراف توصل مع كريستالة خارجية أو مع أداة أخرى تستخدم لقيادة مولد نبضات Clock الداخلي.

ADDRESS LATCH ENABLE (ALE):

تحدث هذه الإشارة خلال حالة Clock الأولى لدورة آلة (machine cycle) وتمكِّن من مسك العنوان في ماسكات على الشريحة، وهذا يسمح لمودول العنوان (address module) كالذاكرة مثلاً بأن تميِّز أنه قد تمت عنونتها.

الحالة (S_{01}, S_1)Status: إشارات تحكم تستخدم لتبيِّن فيما إذا كانت العملية الجارية هي عملية قراءة أو كتابة.

I/O/M: تستخدم لتمكين إما دخل/خرج (I/O)، أو الذاكرة من أجل عمليات قراءة وكتابة.

READ CONTROL (RD):

تبيّن أن المودولات الذاكرية التي تم اختبارها أو الدخل/الخرج سوف تتم القراءة منه، وبأن ممر المعطيات جاهز لنقل المعطيات.

WRITE CONTROL (WR):

تبيّن أن المعطيات الموجودة على ممر المعطيات سوف تكتب في ذاكرة منتقاة أو في موقع I/O (دخل/خرج).

رموز الذاكرة ورموز الدخل/خرج

HOLD: تستخدم لطلب تخلي المعالج عن التحكم واستخدام ممر معطيات خارجي.

يكمل المعالج تنفيذ التعليمة الجاري تنفيذها في مسجل التعليمات ويدخل بعدها في حالة توقف (hold)، وخلال هذه الحالة لا يتم إدخال أية إشارات من قِبل المعالج ووحدة المعالجة المركزية CPU إلى ممرات التحكم، والعنونة والمعطيات.

HOLD ACKNOWLEDGE (HLDA): إشارة خرج من وحدة التحكم، تُشعر من خلالها أنها استلمت إشارة التوقف (hold signal)، وبأن الممر جاهز.

READY: تستخدم لمزامنة وحدة المعالجة المركزية مع الذواكر وأجهزة الدخل/خرج الأقل سرعة منها، فعندما يؤكد جهاز عنوان على حالة (ready)، فإن وحدة المعالجة المركزية يمكن أن تتابع بعملية دخل (DB_{in}) أو بعملية كتابة (WR)؛ وإلا فإن الـــ CPU تدخل بحالة انتظار حتى يصبح الجهاز (device) جاهزاً.

تهيئة وحدة المعالجة المركزية

RESET IN: تتسبب بوضع محتويات عداد البرنامج على الصفر، وتستأنف وحدة المعالجة المركزية التنفيذ من الموقع صفر.

RESET OUT: إشعار بأن وحدة المعالجة المركزية قد تم تصفيرها. يمكن استخدام هذه الإشارة لتصفير المنظومة.

مسجلات الأغراض العامة

يحتوي المعالج 8085 على مجموعة من مسجلات متعددة الأغراض 8-bit هي:

B، C، D، E، H وL، وتسمى هذه المسجلات بمسجلات متعددة الأغراض لأنه يمكن استخدامها بأية طريقة تناسب مبرمجي المعالج الصغري، ويمكن لهذه المسجلات أن تحتفظ بمعطيات عددية، ومعطيات BCD، ومعطيات ASCII، أو بأي نوع آخر من المعلومات اللازمة. يمكن استخدام هذه المسجلات كستة مسجلات (8-bit)، أو كثلاثة مسجلات BC-DE-HL-(16-bit).

تحتفظ أزواج المسجلات بـــ 16-bit من المعطيات العددية، أو بأي معلومات مرمزة بـــ 16-bit. وبالإضافة إلى الاحتفاظ بمعطيات 16-bit، فإن أزواج المسجلات تعنون أيضاً معطيات الذاكرة. والعنوان الذاكري الذي يوضع في زوج من المسجلات يسمح بمعالجة معطيات الموقع الذاكري المعنون، ويسمى هذا النوع من العنونة بالعنونة غير المباشرة (indirect programming).

مسجلات الاستخدامات الخاصة

تجمّع مسجلات الاستخدامات الخاصة نتائج العمليات الحسابية والمنطقية وتقوم بعمل مشابه لعمل مدير الشؤون الخاصة بالمعالج، وهذه المسجلات لا تبرمج بتعليمات ولكنها تستخدم من قِبل المعالج، وتوجد في المعالج 8085 مسجلات الاستخدامات الخاصة التالية:

accumulator: المراكم.

flag register: مسجل العلم.

program counter: عداد البرنامج.

stack pointer: مؤشر المكدس.

تحوي كافة المعالجات على مسجل مراكم (accumulator register) يجمّع أجوبة العمليات الحسابية والمنطقية التي تنفذها وحدة الحساب والمنطق ALU.

تحوي مسجلات العلم (flag registers) المستخدمة في المعالج 8085 5-bit وتستخدم كأعلام (flags) أو كمبينات لوحدة الحساب والمنطق.

تتغيَّر هذه الأعلام عندما ينفذ المعالج 8085 العمليات الحسابية، وتستخدم لبيان حالة العملية الحسابية وتستخدم خانات الأعلام كما يلي:

الخانة الأولى (1): هي خانة إشارة وتبيِّن فيما إذا كان ناتج العملية الحسابية موجباً أو سالباً.

الخانة الثانية (2): خانة صفر واحدة وتبيِّن فيما إذا كان ناتج العملية الحسابية صفراً أو ليس صفراً.

الخانة الثالثة (3): خانة علم حمل مساعد واحدة one auxiliary carry flag وتحتفظ هذه الخانة بالحمل (Carry) الذي يحدث بين أنصاف البايت الأقل أهمية (least significant) والأعظم أهمية (most significant) التي تنتج عن وحدة الـــ ALU.

الخانة الرابعة (4): خانة علم تكافؤ واحدة، وتبيِّن تكافؤ (parity) النتيجة الصادرة عن وحدة الـــ ALU.

الخانة الخامسة (5): خانة علم حمل واحدة، تحتفظ بأي حمل من الخانة الأعظم أهمية من المكدس بعد الجمع (addition) وتحتفظ بأية استعارة (borrow) بعد أي طرح (subtraction).

إن عداد البرنامج (program counter) ليس عداد برامج، ولكنه يحدد التعليمة البرمجية التالية التي ستنفذ من قِبل المعالج، ويعد عبر المواقع الذاكرية بدءاً من العناوين المنخفضة باتجاه العناوين العالية.

يُخزِّن مؤشر المكدس (stack pointer) عنوان آخر إدخال على المكدس، والمكدس هو منطقة تخزين معطيات في الـــ RAM تستخدم من قبل عمليات معالج محدَّدة.

مخطط التوقيت للمعالج 8085A

يبيِّن الشكل (2.K) مثالاً عن توقيت المعالج (8085A)، ويلزم من حيث الجوهر ثلاث دورات آلة هي (M_1، M_2 وM_3).

يتم خلال الدورة الأولى (first cycle) إحضار تعليمة Out، أما خلال الدورة الثانية فيتم إحضار النصف الثاني من التعليمة والذي يحوي على عدد أجهزة الدخل/خرج المنتقاة من أجل الخرج، في الدورة الثالثة تكتب محتويات المراكم (accumulator) في جهاز الخرج المنتخب عبر ممر المعطيات. في بداية كل دورة آلة تقوم وحدة التحكم بتأمين نبضة (ALE) address-latch-enable لتنشيط (إنذار) الدارات الخارجيَّة. خلال حالة التوقيت (T_1) من دورة الآلة (M_1). تقوم وحدة التحكم بوضع الإشارة IO/M في حالة (Set) للدلالة على حدوث عملية ذاكرة، وذلك خلال حالة التوقيت (T_1) لدورة الآلة (M_1)، وخلال هذه الدورة تقوم وحدة التحكم بإصدار تعليمة لعداد البرنامج لوضع محتوياته على ممر العنوان (A_{15} - A_8) وعلى ممر العنوان/معطيات (address/data (AD_7 - AD_0) bus). أما خلال حالة التوقيت (T_2) فإن مودول ذاكرة العنوان يضع محتويات الموقع الذاكري المعنون على ممر العنوان/معطيات وتقوم وحدة التحكم بوضع إشارة القراءة (RD) في حالة (set) للدلالة على حالة قراءة، وتنتظر حتى (T_3) من أجل نسخ المعطيات من الممر، وهذا يعطي للذاكرة وقتاً لوضع المعطيات على الممر ووقتاً لاستقرار مستوى الإشارات.

الحالة الأخيرة (T_4)، هي حالة يكون فيها الممر في حالة عدم استخدام وتقوم خلالها وحدة المعالجة المركزية بفك ترميز التعليمات، وتتابع باقي دورات الآلة بنفس الطريقة.

6.1.K برمجة المعالج الصغري

لكل معالج مجموعة تعليمات خاصة به من أجل إنجاز مهام كالقراءة من الذاكرة، أو جمع الأعداد، أو معالجة المعطيات، فمثلاً تختلف التعليمات التي يستخدمها معالج Pentium الموجود في الحواسيب المتآلفة مع IBM بشكل كبير عن مجموعة تعليمات معالج Motorla المستخدم في حواسيب Macintosh.

واللغة الفعلية التي يستخدمها المعالج هي لغة الآلة وهي تتكون من واحدات (1's) وأصفار (0's)، ولكن لا تتم برمجة المعالج مباشرة بلغة الآلة لأن ذلك معقد جداً، فقد تحتاج عملية الضرب لعددين إلى آلاف التعليمات بلغة الآلة، وبدلاً من ذلك تتم كتابة البرنامج بلغة التجميع (assembly) التي تستخدم الاختصارات والأسماء الرمزية للمواقع الذاكرية وللمتحولات (variables). يتم التحويل من لغة الأسيمبلي إلى لغة الآلة باستبدال كل رمز بشيفرة آلة ستة عشرية (hexadecimal code) مناسبة وتسمى هذه الشيفرة (شيفرة العملية operation code)، أو اختصاراً Opcode ثم تخزن الشيفرة في مواقع ذاكرية محددة، وتعطى هذه المواقع الذاكرية عناوين بالنظام الستة عشري. تتم عملية التحويل باستخدام حزمة برمجية تسمى الـ (assembler) ويتم الحصول على الـ assembler من الجهة الصانعة للمعالج. ويمكن أن يقوم المبرمج أيضاً بهذا العمل بالبحث عن شيفرات التعليمات، وتعطى هذه الشيفرات أيضاً من قبل الجهة الصانعة للمعالج، وكذلك بالبحث عن العناوين الذاكرية لأماكن تخزين هذه الشيفرات. وتسمى هذه الطريقة في البرمجة باسم hand assembly، ويجب عند استخدامها معرفة المواقع الذاكرية ضمن ذاكرة ROM، المخصصة من أجل البرنامج. تسمح لغة الاسيمبلي للمبرمج بكتابة أكثر البرامج انسيابية وكفاءة بالنسبة للذاكرة، مما يؤمن أزمنة تنفيذ سريعة، ولكن البرمجة بلغة الاسيمبلي ليست سهلة أبداً.

يمكن استخدام لغات عالية المستوى كلغات BASIC، والباسكال PASCAL واللغة (C) لكتابة برامج المعالجات ويسهل ذلك عملية البرمجة كثيراً، حيث يمكن استخدام تعليمات مثل (if ... then) و(for ... next) وغيرها وعند استخدام هذه الطريقة في البرمجة لا داعي لمعرفة المواقع الذاكرية المخصصة للبرنامج أو لمعرفة ما هي الخانات التي تزاح إلى مسجل معين وباختصار لا يوجد أي داعٍ للاهتمام بالتفصيلات، وكل ما عليك هو كتابة البرنامج بعد الإعلان عن المتحولات. يصبح البرنامج قابلاً للاستخدام من قبل المعالج بعد عمليات هامة هي تحويل البرنامج من لغة عالية المستوى إلى لغة الأسيمبلي، ثم تحويل برنامج الأسيمبلي إلى برنامج بلغة الآلة. يسمى البرنامج المكتوب بلغة برمجة عالية المستوى باسم (Source code) وتسمى عملية تحويله إلى الأسيمبلي باسم Compiling وتتم عملية التحويل بواسطة برنامج يُسمى (Compiler) وتحتاج البرامج المكتوبة بلغات (C)، FORTRAN وPASCAL إلى عملية (Compiling)، أما اللغة BASIC فهي لغة مفسَّرة (interpretered language) وبدلاً من استخدام عملية Compiling للحصول على برنامج assembly من برنامج الـ BASIC، فإن برنامج مفسر (Interpreter) يقوم بتنفيذ التعليمات، ولكن سرعة اللغات التي تستخدم المفسِّر (interpreter) أقل بكثيرٍ من سرعة اللغات التي تستخدم الـ (compiler)، وسوف نتحدث عن الـ Compiler والـ interpreter لاحقاً.

تُعطى في الجدول (1.K) شيفرات BASIC، وأسيمبلي (8085 A) ولغة الآلة (8085 A) للعد من (5) إلى (0 صفر) عداً تنازلياً. لاحظ أن برنامج الـ BASIC لا يحتاج إلى شرح لأن تعليمات البرنامج تشرح نفسها بنفسها، وعلى الرغم من ذلك نبيِّن ما الذي يجري في هذا البرنامج.

في السطر (10) يتم إنقاص (1) من القيمة المسندة للمتحول فيصبح المتحول COUNT مساوياً (4). في السطر (30) نختبر فيما إذا كان المتحول مساوياً للصفر يعود تنفيذ البرنامج إلى السطر (10) وإذا لم يكن مساوياً للصفر يتم القفز إلى السطر (20). أما تعليمات لغة الأسيمبلي للمعالج (8085 A) لإنجاز عملية العد التنازلي من (5) إلى الصفر فهي MVI، DCR وSTART وتُعطى في الجدول (2.K) كافة تعليمات لغة الأسيمبلي للمعالج (8085 A). وسنشرح الآن معاني التعليمات الواردة في الجدول (1.K).

MVI A, 05 H:	حرِّك قيمة 05 (H تعني أن العدد معطى بنظام العد الستة عشري Hexadecimal) إلى المسجل A (المكدس accumulator).
DCR A:	وتعني خفِّض قيمة المسجل A بمقدار واحد decrement register A by 1
JZ START:	قفز شرطي، إلى الشرط الذي تبحث عنه هذه العبارة هو شرط الصفر.

عندما تنخفض قيمة المسجل A وتصبح مساوية للصفر، فإن خانة العلم، المسماة علم الصفر Zero flag تصبح في حالة Set (توضع على حالة 0) والتعليمة JZ START تفسر بالشكل التالي (اقفز إلى سطر التعليمة الذي علامته (LABLE) هي START إذا كان علم الصفر في حالة (Set) وإذا لم يتحقق هذا الشرط يقفز البرنامج إلى التعليمة التالية وهي jump loop وهي تعليمة قفز غير شرطي ومعناها اقفز إلى التعليمة التي علامتها LOOP بغض النظر عن أية حالة للأعلام. أما في لغة الآلة فإن تعليمة MVI A,05H تحتاج إلى 2-byte. البايت الأول هو شيفرة العملية opcode وهي (binary 0011 1110) 3E وهي التي تعرف التعليمة للمعالج، أما البايت الثاني فهو المعامل (operand) وهو هنا قيمة المعطيات 05. شيفرة العملية للتعليمة JZ هي CA (في الثنائي 1100 1010) أما الـ 16-bit فهي العنوان الذي يتم القفز إليه إذا لم يتحقق شرط الصفر (Zero) وهذا يجعل التعليمة، تعليمة 3-byte؛ البايت الثاني من التعليمة (الموقع 4004 hex) هو البايت الأقل أهمية من العنوان والبايت الثالث هو البايت الأكثر أهمية من العنوان الذي سيتم القفز إليه. شيفرة التعليمة لـ JMP هي (C3)، يقابلها في الثنائي (1100 0011) ويجب أن تتبع هذه الشيفرة بعنوان 16-bit (2 بايت) يحدد الموقع الذي يتم القفز إليه.

الجدول (1.K) برنامج للعد التنازلي من (5) إلى صفر باستخدام لغات BASIC، لغة الآلة Assembly Language ولغة الآلة Machine Language.

BASIC LANGUAGE		8085 ASSEMBLY LANGUAGE		8085 MACHINE LANGUAGE	
LINE	INSTRUCTION	LABEL	INSTRUCTION	ADDRESS (HEX)	CONTENTS
10	COUNT = 5	START:	MVIA,05H	4000	3E(opcode)
20	COUNT = COUNT-1			4001	05(data)
30	IF COUNT = 0 THEN GOTO10	LOOP:	DCRA	4002	3D(opcode)
			JZ START	4003	CA(opcode)
40	GOTO 20			4004	00 } (address)
				4005	40
			JUMP LOOP	4006	C3(opcode)
				4007	02 } (address)
				4008	40

2.K المتحكمات الصغريّة

تلاحظ مما سبق تغطيته حتى الآن أن برمجة المعالجات الصغرية (حتى الأنواع البسيطة منها)، وأن تأمين ترابط كافة الشرائح الداعمة كالذواكر RAM، ROM، ومتحكمات I/O وغيرها هي أعمال صعبة. ويحتاج ذلك إلى تحميل البرنامج في ذاكرة ROM، وتوصيل أجهزة الخرج والدخل (I/O devices) إلى الممرات وكتابة برنامج للتخاطب مع أجهزة الدخل/الخرج وفهم بروتوكولات المقاطعة وغيرها من الأعمال، ولذلك تعتبر منظومات المعالجات، كالمنظومات الموجودة في الحواسيب صعبة التصميم، و لم يعد هناك ضرورة هذه الأيام لتصميم مثل هذه المنظومات من الألف إلى الياء بل يتم شراء اللوحة الأم للحاسوب (motherboard) وتوصل مع هذه اللوحة مودولات الذواكر DIMMs، SIMMs، وبطاقة الصوت (Sound card) وسواقات الأقراص (disk drives)، وغيرها، ولا يحتاج مثل هذا العمل للكثير من التفكير لأن المعالجات الموجودة على اللوحة الأم والأجهزة الأخرى الموصولة معها هي التي تتولى كل الأعمال.

الجدول (2.K): ملخص مجموعة تعليمات المعالج Intel 8085 A.

MNEMONIC	OPCODE	SZAPC	~S	DESCRIPTION	NOTES
ACI n	CE	*****	7	Add with Carry Immediate	A = A + n + CY
ADC r	8F	*****	4	Add with Carry	A = A + r + CY (21X)
ADC M	8E	*****	7	Add with Carry to Memory	A = A + [HL] + CY
ADD r	87	*****	4	Add	A = A + r (20X)
ADD M	86	*****	7	Add to Memory	A = A + [HL]
ADI n	C6	*****	7	Add Immediate	A = A + n
ANA r	A7	****0	4	AND Accumulator	A = A&r (24X)
ANA M	A6	****0	7	AND Accumulator and Memory	A = A&[HL]
ANI n	E6	**0*0	7	AND Immediate	A = A&n
CALL a	CD	-----	18	Call unconditional	-[SP] = PC, PC = a
CC a	DC	-----	9	Call on Carry	If CY = 1 (18-s)
CM a	FC	-----	9	Call on Minus	If S = 1 (18-s)
CMA	2F	-----	4	Complement Accumulator	A = ~A
CMC	3F	----*	4	Complement Carry	CY = ~CY
CMP r	BF	*****	4	Compare	A – r (27X)
CMP M	BF	*****	7	Compare with Memory	A – [HL]
CNC a	D4	-----	9	Call on No Carry	If CY = 0 (18-s)
CNZ a	C4	-----	9	Call on No Zero	If Z = 0 (18-s)
CP a	F4	-----	9	Call on Plus	If S = 0 (18-s)
CPE a	EC	-----	9	Call on Parity Even	If P = 1 (18-s)
CPI n	FE	*****	7	Compare Immediate	A – n
CPO a	E4	-----	9	Call on Parity Odd	If P = 0 (18-s)
CZ a	CC	-----	9	Call on Zero	If Z = 1 (18-s)
DAA	27	*****	4	Decimal Adjust Accumulator	A = BCD format
DAD B	09	----*	10	Double Add BC to HL	HL = HL + BC
DAD D	19	----*	10	Double Add DE to HL	HL = HL + DE
DAD H	29	----*	10	Double Add HL to HL	HL = HL + HL
DAD SP	39	----*	10	Double Add SP to HL	HL = HL + SP
DCR r	3D	****-	4	Decrement	r = r – 1 (0X5)
DCR M	35	****-	10	Decrement Memory	[HL] = [HL] – 1
DCX B	0B	-----	6	Decrement BC	BC = BC – 1
DCX D	1B	-----	6	Decrement DE	DE = DE – 1
DCX H	2B	-----	6	Decrement HL	HL = HL – 1
DCX SP	3B	-----	6	Decrement Stack Pointer	SP = SP – 1

MNEMONIC	OPCODE	SZAPC	~S	DESCRIPTION	NOTES
DI	F3	-----	4	Disable Interrupts	
EI	FB	-----	4	Enable Interrupts	
HLT	76	-----	5	Halt	
IN p	DB	-----	10	Input	A = [p]
INR r	3C	****-	4	Increment	r = r + 1 (0X4)|
INR M	3C	****-	10	Increment Memory	[HL] = [HL] + 1
INX B	03	-----	6	Increment BC	BC = BC + 1
INX D	13	-----	6	Increment DE	DE = DE + 1
INX H	23	-----	6	Increment HL	HL = HL + 1
INX SP	33	-----	6	Increment Stack Pointer	SP = SP + 1
JMP a	C3	-----	7	Jump unconditional	PC = a
JC a	DA	-----	7	Jump on Carry	If CY = 1 (10~s)
JM a	FA	-----	7	Jump on Minus	If S = 1 (10~s)
JNC a	D2	-----	7	Jump on No Carry	If CY = 0 (10~s)
JNZ a	C2	-----	7	Jump on No Zero	If Z = 0 (10~s)
JP a	F2	-----	7	Jump on Plus	If S = 0 (10~s)
JPE a	EA	-----	7	Jump on Parity Even	If P = 1 (10~s)
JPO a	E2	-----	7	Jump on Parity Odd	If P = 0 (10~s)
JZ a	CA	-----	7	Jump on Zero	If Z = 1 (10~s)
LDA a	3A	-----	13	Load Accumulator direct	A = [a]
LDAX B	0A	-----	7	Load Accumulator indirect	A = [BC]
LDAX D	1A	-----	7	Load Accumulator indirect	A = [DE]
LHLD a	2A	-----	16	Load HL Direct	HL = [a]
LXI B,nn	01	-----	10	Load Immediate BC	BC = nn
LXI D,nn	11	-----	10	Load Immediate DE	DE = nn
LXI H,nn	21	-----	10	Load Immediate HL	HL = nn
LXI SP,nn	31	-----	10	Load Immediate Stack Ptr	SP = nn
MOV r1,r2	7F	-----	4	Move register to register	r1 = r2 (1XX)
MOV M,r	77	-----	7	Move register to Memory	[HL] = r (16X)
MOV r,M	7E	-----	7	Move Memory to register	r = [HL] (1X6)
MVI r,n	3E	-----	7	Move Immediate	r = n (0X6)
MVI M,n	36	-----	10	Move Immediate to Memory	[HL] = n
NOP	00	-----	4	No Operation	
ORA r	B7	**0*0	4	Inclusive OR Accumulator	A = Avr (26X)|
ORA M	B6	**0*0	7	Inclusive OR Accumulator	A = Av [HL]

MNEMONIC	OPCODE	SZAPC	~S	DESCRIPTION	NOTES
ORI n	F6	**0*0	7	Inclusive OR Immediate	A = Avn
OUT p	D3	-----	10	Output	[p] = A
PCHL	E9	-----	6	Jump HL indirect	PC = [HL]
POP B	C1	-----	10	Pop BC	BC = [SP] +
POP D	D1	-----	10	Pop DE	DE = [SP] +
POP H	E1	-----	10	Pop HL	HL = [SP] +
POP PSW	F1	-----	10	Pop Processor Status Word	{PSW,A} = [SP] +
PUSH B	C5	-----	12	Push BC	– [SP] = BC
PUSH D	D5	-----	12	Push DE	– [SP] = DE
PUSH H	E5	-----	12	Push HL	– [SP] = HL
PUSH PSW	F5	-----	12	Push Processor Status Word	– [SP] = {PSW,A}
RAL	17	----*	4	Rotate Accumulator Left	A = {CY,A} < –
RAR	1F	----*	4	Rotate Accumulator Right	A = –> {CY,A}
RET	C9	-----	10	Return	PC = [SP] +
RC	D8	-----	6	Return on Carry	If CY = 1 (12~s)
RIM	20	-----	4	Read Interrupt Mask	A = mask
RM	F8	-----	6	Return on Minus	If S = 1 (12~s)
RNC	D0	-----	6	Return on No Carry	If CY = 0 (12~s)
RNZ	C0	-----	6	Return on No Zero	If Z = 0 (12~s)
RP	F0	-----	6	Return on Plus	If S = 0 (12~s)
RPE	E8	-----	6	Return on Parity Even	If P = 1 (12~s)
RPO	E0	-----	6	Return on Parity Odd	If P = 0 (12~s)
RZ	C8	-----	6	Return on Zero	If Z = 1 (12~s)
RLC	07	----*	4	Rotate Left Circular	A = A <–
RRC	0F	----*	4	Rotate Right Circular	A = –> A
RST z	C7	-----	12	Restart	(3X7) – [SP] = PC,PC = z
SBB r	9F	*****	4	Subtract with Borrow	A = A – r – CY
SBB M	9E	*****	7	Subtract with Borrow	A = A – [HL] – CY
SBI n	DE	*****	7	Subtract with Borrow Immed	A = A – n – CY
SHLD a	22	-----	16	Store HL Direct	[a] = HL
SIM	30	-----	4	Set Interrupt Mask	mask = A
SPHL	F9	-----	6	Move HL to SP	SP = HL
STA a	32	-----	13	Store Accumulator	[a] = A
STAX B	02	-----	7	Store Accumulator indirect	[BC] = A

MNEMONIC	OPCODE	SZAPC	~S	DESCRIPTION	NOTES
STAX D	12	-----	7	Store Accumulator indirect	[DE] = A
STC	37	----1	4	Set Carry	CY = 1
SUB r	97	*****	4	Subtract	A = A − r (22X)
SUB M	96	*****	7	Subtract Memory	A = A − [HL]
SUI n	D6	*****	7	Subtract Immediate	A = A − n
XCHG	EB	-----	4	Exchange HL with DE	HL <-> DE
XRA r	AF	**0*0	4	Exclusive OR Accumulator	A = Axr (25X)
XRA M	AE	**0*0	7	Exclusive OR Accumulator	A = Ax [HL]
XRI n	EE	**0*0	7	Exclusive OR Immediate	A = Axn
XTHL	E3	-----	16	Exchange stack Top with HL	[SP] <-> HL

Notes:

	SZAPC	
PSW	0 * 0 1	Flag unaffected/affected/reset/set
S	S	Sign (Bit 7)
Z	Z	Zero (Bit 6)
AC	A	Auxilary Carry (Bit 4)
P	P	Parity (Bit 2)
CY	C	Carry (Bit 0)
a p		Direct addressing
M z		Register indirect addressing
n nn		Immediate addressing
r		Register addressing
DB n (,n)		Define Byte(s)
DB 'string'		Define Byte ASCII character string
DS nn		Define Storage Block
DW nn (,nn)		Define Word(s)
A B C D E F L		Registers (8-bit)
BC DE HL		Register pairs (16-bit)
PC		Program Counter register (16-bit)
PSW		Processor Status Word (8-bit)
SP		Stack Pointer register (16-bit)
a nn		16-bit address/data (0 to 65535)
n p		8-bit data/port (0 to 255)
r		Register (X = B, C, D, E, H, L, M, A)
z		Vector (X = 0H, 8H, 10H, 18H, 20H, 28H, 30H, 38H)
+ −		Arithmetic addition/subtraction
& ~		Logical AND/NOT
v x		Logical inclusive/exclusive OR
< − − >		Rotate left/right
< − >		Exchange
[ ]		Indirect addressing
[ ] + − [ ]		Indirect address auto-inc/decrement
{ }		Combination operands
(X)		Octal op code where X is a 3-bit code
If (~s)		Number of cycles if condition is true

Source: From J. P. Bowen, 1985 Programming Research Group, Oxford University Computing Laboratory.

عند تصميم الأجهزة الإلكترونية القابلة للبرمجة يستخدم المتحكم الصغري (Microcontroller) والمتحكم الصغري هو عبارة عن معالج صغري خاص يحتوي ضمن دارته المتكاملة على العديد من الدارات الداعمة مثل ذواكر ROM وRAM، ومنافذ الاتصال التسلسلي (Serial Communication Ports)، والمبدلات التشابهية الرقميَّة (A/D converters)، وغيرها.

يمكن من حيث الجوهر اعتبار المتحكم الصغري مثل الحاسوب ولكن بدون لوحة مفاتيح ومرقاب (monitor) وفأرة (mouse) ويسمى بالمتحكم الصغري لأنه صغير الحجم (micro) ولأنه يتحكم بالتجهيزات (Controller)، ويمكن باستخدام المتحكم الصغري بناء آلة ذكية، ويكتب برنامج المتحكم الصغري باستخدام حاسوب ويحمَّل البرنامج إلى المتحكم الصغري عن طريق المنفذ التسلسلي أو التفرعي للحاسوب بواسطة كابل يوصل جهاز الحاسوب مع المتحكم الصغري، وبعد ذلك يفصل الكابل ويصبح البرنامج جاهزاً للعمل. يستخدم متحكم صغري، على سبيل المثال في أفران المايكروويف، ويقوم هذا المتحكم بالقراءة من لوحة مفاتيح صغيرة موجودة على واجهة الفرن، وبالكتابة على وحدة إظهار، وبالتحكم بعناصر التسخين، وبتخزين المعطيات كزمن الطبخ (cooking time).

تتوفر في الأسواق آلاف الأنواع المختلفة من المتحكمات الصغريَّة، فبعضها يمكن برمجته لمرة واحدة one-time programmable (OTP)، وهذا يعني أنه لا يمكن إجراء تغييرات على البرنامج بعد كتابته إلى ذاكرة (OTP-ROM). تستخدم المتحكمات الصغرية القابلة للبرمجة مرة واحدة في أفران المايكروويف، وفي أنظمة الحساسات المستخدمة في السيارات وفي جلايات الصحون (dishwashers) وغيرها من التطبيقات والأجهزة ذات الاستخدامات الخاصة التي لا تحتاج بعد التصنيع إلى تغيير برنامج عملها الأساسي. أما الأنواع الأخرى من المتحكمات الصغرية فهي قابلة لإعادة البرمجة (reprogrammable) وهذا يعني أن برنامج المتحكم المخزون في ذاكرة ROM (والتي يمكن أن تكون EPROM، أو EEPROM، أو ذاكرة flash) يمكِن تغييره إذا لزم الأمر ـــ وهذه الميزة هامة وخاصة عند بناء نموذج تجريبي أو عند تصميم أجهزة اختبار تحتاج مستقبلاً إلى أجهزة دخل/خرج.

تستخدم المتحكمات الصغرية في العديد من الأجهزة، كأجهزة الطوارئ (pagers)، والألعاب (السيارات والطائرات المستخدمة كألعاب) وفي نظم الفرملة غير القابلة للقفل (antilock breaking systems)، وفي أجهزة الفيديو (VCRs)، وأفران المايكروويف (microwave ovens)، وفي أنظمة الإنذار وفي حواقن الوقود، وفي أجهزة التمرُّن وغيرها.

كما يمكن استخدامها أيضاً في بناء الأجهزة المسماة إنسان آلي (robots) حيث تعمل كدماغ للإنسان الآلي لمراقبة وقيادة أجهزة دخل وخرج مختلفة، كالحساسات الضوئية، ومحركات الخطوة، ومحركات السيرفو، وحساسات الضوء، وأجهزة الصوت، وغيرها. وعند استخدام المتحكم الصغري في إنسان آلي يمكن بالقليل من البرمجة جعل الروبوت يتجنب الاصطدام بالأجسام، وأن يمسح الأرض، وأن يولد أصواتاً مختلفة، وأن يؤشر على حدوث مشاكل (كانخفاض الطاقة أو عند انقلابه على الأرض أو غيرها من المشاكل)، أو عند الانتهاء من المسح.

هذه فقط بعض تطبيقات المتحكم الصغري فقائمة التطبيقات طويلة جداً.

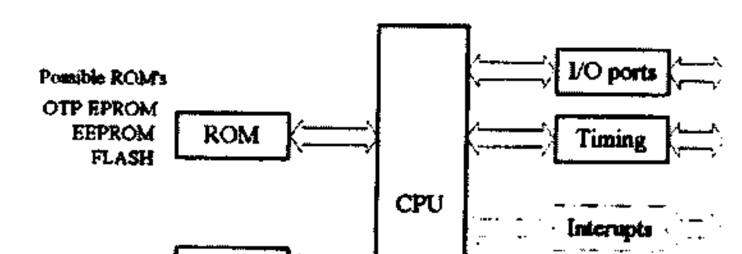
1.2.K التركيب الأساسي للمتحكم الصغري

يبيِّن الشكل (3.K) المكونات الأساسية للمتحكمات الصغرية وهي:

CPU (وحدة المعالجة المركزية)، ROM (ويمكن أن تكون الذاكرة ROM من نوع OTP-ROM أو EPROM أو EEPROM أو FLASH)، RAM، منافذ دخل خرج I/O ports، دارات توقيت، تحكم بالمقاطعة، وصلة الربط التسلسلي serial port adapter (مثل UART، وUSART)، ومبدلات تشابهي إلى رقمي ورقمي إلى تشابهي D/A وA/D.

إن وحدة المعالجة المركزية CPU مكافئة للمعالج الصغري وتسمى عادة (imbedded processor المعالج الضمني). وهي العنصر المفكر في المتحكم الصغري. تستعيد وحدة المعالجة المركزية تعليمات البرنامج التي برمجها المستخدم في ذاكرة ROM، في حين تستخدم ذاكرة RAM لتخزين المعطيات المؤقتة اللازمة خلال تنفيذ البرنامج. تستخدم منافذ الدخل/خرج لوصل أجهزة خارجيَّة ترسل تعليمات إلى وحدة المعالجة المركزية وتستقبل تعليمات منها.

A very simplist view of the basic components of a microcontroller



Possible internal architectures: RISC, SISC, CISC, Harvard, Von-Neuman

الشكل (3.K): شكل مبسط جداً للمكونات الداخلية للمتحكم الصغري.

تستخدم وصلة المنفذ التسلسلي لتأمين التخاطب بين المتحكم الصغري والحاسوب، أو بين متحكمين صغريين، وهي المسؤولة عن معدلات تدفق المعطيات بين الأجهزة. وكمثال على وصلات المنافذ التسلسلية الموجودة في المتحكم الصغري وصلة UART مرسل مستقبل غير متزامن عمومي (Universal asynchronous receiver transmitter) أو USART (مرسل مستقبل متزامن/غير متزامن عمومي). يستطيع UART التعامل مع الاتصالات التسلسلية غير المتزامنة أما USART فإنها تتعامل مع الاتصالات التسلسلية المتزامنة وغير المتزامنة.

يستخدم نظام مقاطعة (interrupt system) لمقاطعة البرنامج، من أجل معالجة تكرارية خاصة تسمى تكرارية خدمة مقاطعة (interrupt service routine). يقوم المتحكم الصغري بأخذ عينات من معطيات خارجية تحتاج إلى معالجة فورية وإصدار تعليمات فورية أيضاً متناسبة مع الحالات الطارئة لهذه المعطيات، فمثلاً عندما تكون المعطيات الواردة من حساس تشير إلى أن درجة الحرارة قد أصبحت عالية جداً، أو إذا كان الحساس الخاص بمراقبة تباعد جسمين يعطي إشارة إلى المتحكم بأن الأجسام التي تتم مراقبتها قد أصبحت متقاربة جداً. في مثل هذه الحالات تحدث مقاطعة للبرنامج ويقوم المتحكم الصغري بالاعتماد على هذه الإشارات بإعطاء تعليمات إلى أجهزة خارجية لفصل التغذية عن الجهاز الذي ارتفعت حرارته كثيراً، ولتحريك الأجسام المتقاربة بحيث تتباعد عن بعضها كي لا يحدث اصطدام. يوجد في بعض أنواع المتحكمات الصغريَّة مبدلات تشابهي إلى رقمي A/D ورقمي إلى تشابهي D/A، ويمكن استخدام هذه المبدلات لتأمين الربط اللازم بين المبدلات التشابهية للطاقة (analog transducers) كالحساسات الحراريَّة، وحساسات الإجهاد وحساسات الموضع (position sensors) وغيرها.

المتحكمات PIC16C57 وPIC16C56 كأمثلة عن المتحكمات الصغرية

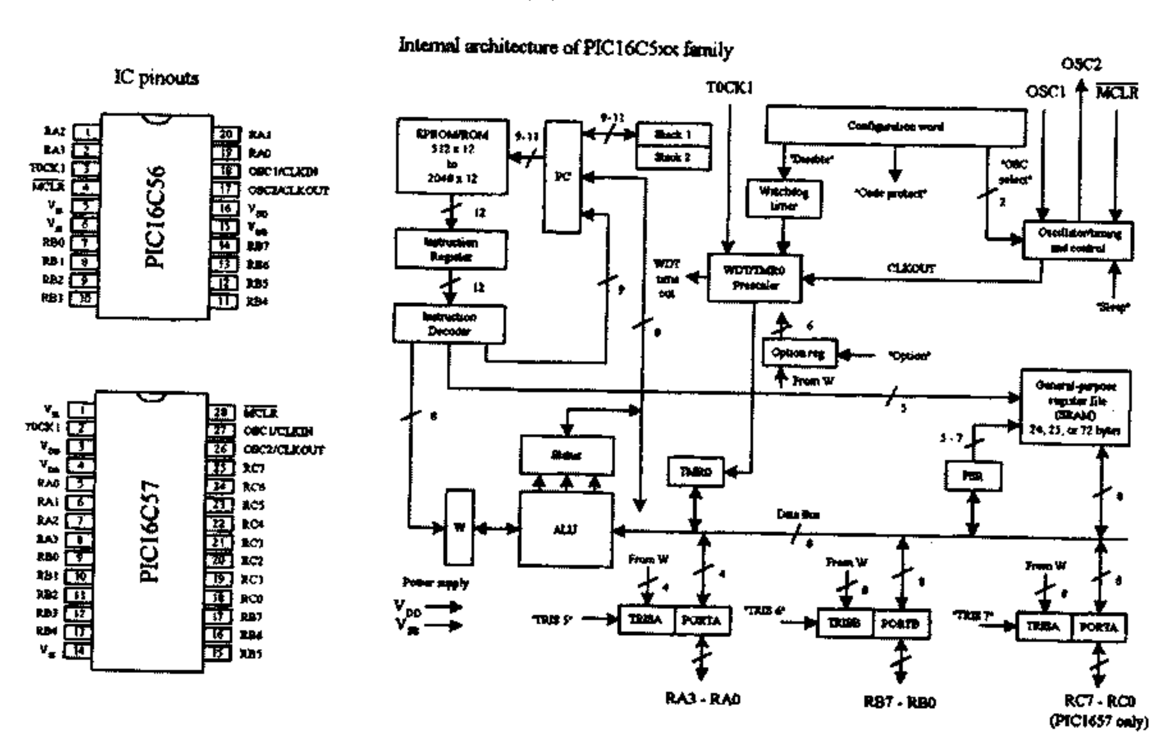
يبيِّن الشكل (4.K) المتحكمات الصغرية PIC16C57 وPIC16C56 من إنتاج شركة Microchip، وكما تلاحظ من مخطط البنية الداخلية، فإن هذه المتحكمات تحوي ضمن الشريحة المتكاملة للمتحكم على:

وحدة معالجة مركزية CPU، EPROM، RAM وعلى دارات دخل/خرج I/O Circuitary. ترتكز البنية على استخدام ممرات وذواكر مختلفة لكلٍ من البرنامج والمعطيات (Harvard architecture) وتسمح هذه البنية بالتنفيذ التفرعي. فبينما تكون تعليمة جديدة في طوْر الإحضار، تكون التعليمة الحالية في طور التنفيذ على ممر المعطيات.

يبلغ حجم ذاكرة البرنامج (EPROM) في المتحكم PIC1656 (1024 كلمة) أما في المتحكم PIC1657 فهو (2048 كلمة).

تحوي وحدة الحساب والمنطق (8-bit ALU) على مسجل عامل مؤقت (temporary working register) وتنجز الوحدة ALU الوظائف الحسابية والبوليانية (Boolean) بين المعطيات الموجودة في المسجل المؤقت وأي مسجل ملف (file register). تتكون الـ ALU ومسجل الملف من حتى (80) مسجل (8-bit) قابلة للعنونة، أما منافذ الدخل/خرج فهي موصولة عبر ممر معطيات 8-bit، كما أن (32) بايت من الـ RAM قابلة أيضاً للعنونة المباشرة، أما الولوج إلى البايتات المتبقيَّة فإنه يعمل عبر الـ bank switching. تحتاج متحكمات PIC من أجل حركة البتات إلى وصل هزاز كريستالي أو سيراميكي (crystal or ceramic resonator) بين الأرجل OSC1 وOSC2 وتبلغ سرعة أداء متحكمات PIC حتى (5) مليون تعليمة في الثانية (5MIPS) عند تردد Clock يساوي 20 MHz. تحتوي الشريحة على هزاز RC لا يحتاج إلى عناصر خارجية ويسمى هزاز العمل الحر (free running RC oscillator)، ويستمر هذا الهزاز بالعمل حتى عند توقف Clock مما يسمح بتوليد reset بشكلٍ مستقل عن كون المتحكم في حالة عمل أو في حالة نوم (sleeping).

للمتحكمات المذكورة عدد من أرجل الدخل/خرج يمكن أن توصل إلى أجهزة خارجيّة كالحساسات الضوئية، الجهرات (speakers)، الديودات المصدرة للضوء (LEDs)، أو إلى دارات منطقية أخرى. للمتحكم IC16C56 (12) رجل دخل/خرج مقسمة إلى ثلاثة منافذ هي المنفذ A (RA3-RA0)، المنفذ B (RB7-RB0) والمنفذ C (RC7-RC0)، أما المتحكم PIC16C57 فله ثماني أرجل دخل/خرج إضافية بالمقارنة مع PIC16C57.



الشكل (4.K): المتحكمات PIC16C56 وPIC16C57.

2.2.K برمجة المتحكم الصغري

تستخدم المتحكمات الصغرية، مثل المعالجات الصغرية، مجموعة من التعليمات المرمزة بلغة الآلة (واحدات 1s وأصفار 0s) لإنجاز مهام مختلفة مثل الجمع، والمقارنة، والقراءة من منافذ دخل وإخراج معطيات إلى أجهزة خرج عبر منافذ الخرج. تبرمج تعليمات لغة الآلة إلى ذاكرة ROM (EPROM، أو EEPROM أو FLASH) موجودة ضمن شريحة المتحكم بواسطة

وحدة برمجة (Programming unit) ترتبط مع حاسوب. ولكن لغة البرمجة الفعلية لا تكتب بلغة الآلة وإنما تكتب بلغة عالية المستوى بواسطة برنامج يعمل على حاسوب (PC)، ويمكن أن تكون اللغة المستخدمة معروفة كاللغة (C) أو لغة خاصة طورتها الجهة الصانعة للاستفادة القصوى من ميزات المتحكم الصغري. ويمكن باستخدام الدليل الذي تقدمه الشركة الصانعة تعلم كيفية متابعة تعليمات بلغة تشبه إلى حد ما العبارات المألوفة لإعلام المتحكم الصغري عن العمل الذي يجب عليه إنجازه. وتتم كتابة البرنامج وبعد ذلك يمكن اختبار البرنامج لكشف الأخطاء القواعديَّة، وعند التأكد من خلو البرنامج من الأخطاء يتم حفظ البرنامج ثم تشغيل برنامج Compiler لترجمته إلى لغة الآلة، وإذا كان هناك خطأ في برنامج يمكن أن يرفض برنامج الـ Compiler تحويله إلى لغة الآلة وعندها يجب العودة إلى البرنامج لتحديد الخطأ وإصلاحه. وبعد إصلاح الخطأ وإجراء عملية Compiling (ترجمة إلى لغة الآلة) بنجاح، يُستخدم برنامج آخر لتحميل برنامجك إلى المتحكم الصغري ويتطلب ذلك وضع المتحكم الصغري على وحدة برمجة خاصة (special programmer unit) موصولة مع الحاسوب عبر المنفذ التسلسلي أو التفرعي.

يمكن برمجة المتحكم الصغري بواسطة المفسِّر (interpreter) بدلاً من المترجم (compiler)، والمفسر هو مترجم للغة عالية المستوى ولكنها غير موجودة على حاسوب وإنما في ذاكرة ROM، وهذا يعني أنك بحاجة لذاكرة ROM خارجية لتخزين البرنامج الفعلي، وذاكرة ROM الخارجية يمكن أن تكون (EPROM، EEPROM، FLASH). يتلقى المفسِّر اللغة عالية المستوى من حاسوب ويقوم بترجمة الشيفرة ويضع الشيفرة المترجمة في ذاكرة ROM خارجيَّة، ويمكن استخدام الذاكرة الخارجيَّة من قبل المتحكم الصغري، قد يبدو لك أن استخدام المفسِّر (interpreter) فيه إضاعة لجزء من الذاكرة، لأن المفسِّر يستهلك حيزاً مهماً من الذاكرة. ومع أن استخدام المفسِّر يجعل العمل بطيئاً بسبب استرداد تعليمات البرنامج من ذاكرة خارجيَّة، إلا أن استخدام المفسِّر له ميزة إيجابية هامة جداً، وهي خلق علامة تفاعلية بين البرنامج (host program) والمتحكم الصغري، وهذا يسمح ببناء البرنامج وبتجريب أجزاء صغيرة من البرنامج مباشرة واختبار البرنامج بتحميله إلى المتحكم للتأكد من صحة عمل البرنامج. إن البرنامج المضيف (host program) المستخدم لكتابة شيفرة المصدر (source code) يكون مزوَّداً عادة بخصائص كشف الأخطاء التي تسمح لك بمعرفة الأخطاء البرمجية والعتادية ممكنة الحدوث وأماكنها وذلك كله يظهر لك على شاشة الحاسوب في نفس الوقت الذي يُنفذ فيه البرنامج بواسطة المتحكم الصغري ويمكنك هذا من الضبط الدقيق للبرنامج. كضبط تكراريات توليد الصوت، أو تكرارية التحكم بمحرك خطوة، ثم المتابعة في البرنامج إلى نهايته.

3.2.K متحكمات مع مفسِّر وأشياء إضافية أخرى

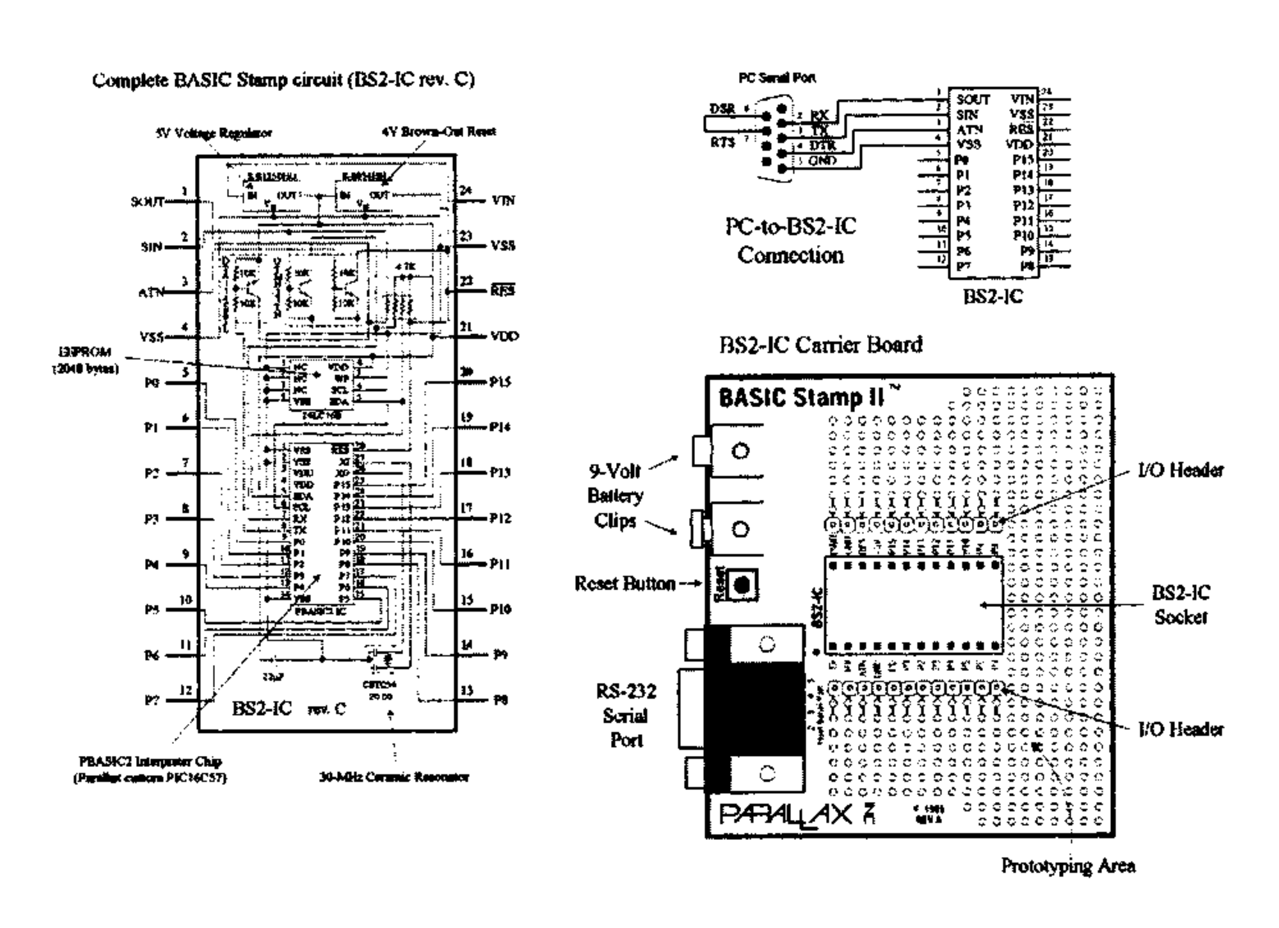
تسمى هذه المتحكمات باسم BASIC Stamps (الطوابع الأساسيَّة) وقد أخذت هذه التسمية لأنها تشبه الطابع البريدي (Postage Stamp)، والمتحكم من هذا النوع مزوَّد ببرنامج مفسِّر موجود على شريحة المتحكم (interpreter software built in) وبمجموعة من الدارات الداعمة الإضافية، مثل الـ EEPROM، ومنظم جهد، هزاز سيراميكي (ceramic oscillator). يعتبر الـ BASIC Stamp مثالياً بالنسبة للمبتدئين لأنه سهل البرمجة، ورخيص الكلفة ويتمتع بميزات جيدة وتكلف مجموعته الكاملة حوالي $ 150، وهو شائع الاستخدام من قبل الهواة والمبتكرين وتتوفر الكثير من المراجع المفيدة عنه إضافة إلى ملاحظات وتوجيهات تطبيقية ومشاريع مجربة على شبكة الإنترنت.

ظهر النوع الأصلي من هذه المتحكمات عام 1993 وقدمته شركة .Parallax, Inc والإصدار الأول منه هو (REV D) وقادت التطورات اللاحقة إلى BASIC Stamp I (BSI) ثم إلى Basic Stamp II (BSII) وسوف نركز على (BSI) و(BSII). يمتلك كلا المتحكمين تعليمات تفسير أساسية موجودة في ذاكرة EPROM للمتحكم الصغري ويستخدم فيهما متحكم صغري من نوع PIC. يُخزن البرنامج الأساسي الذي سيتم تشغيله على EEPROM موجود ضمن شريحة المتحكم. عند وصل بطارية التغذية يتم تشغيل البرنامج الأساسي الموجود في الذاكرة، ويمكن إعادة برمجة الـ Stamps في أي وقت بوصل الـ Stamp إلى حاسوب يعمل عليه برنامج مضيف (host program). يكتب البرنامج الجديد ويحمل البرنامج على الـ stamp. يمكن وصل أطراف الدخل/خرج مع أجهزة رقمية أخرى مثل مفاتيح التحسس، والديودات المصدرة للضوء LED، ووحدات الإظهار LCD، ومحركات السيرفو، ومحركات الخطوة وغيرها.

BASIC Stamp II (BSII-IC)

الـــ BSII هو عبارة عن مودول له (28) رجلاً موزعة على صفين متناظرين (انظر الشكل 5.K)، ودماغ الـــ BSII هو المتحكم الصغري PIC16C57 والمبرمج بشكلٍ مؤقت بمجموعة تعليمات PBASIC2 ويتوضع هذا البرنامج في ذاكرة OTP-ROM داخلية (ذاكرة تبرمج لمرة واحدة)، وعند برمجة الـــ BSII فإن الـــ PIC16C57 يخزّن رموزاً تسمى (tokens) في ذاكرة EEPROM خارجيَّة. عند تشغيل البرنامج فإن الـــ PIC16C57 يجلب الرموز (token) من الذاكرة ويترجمها ويفسرها كتعليمات PBASIC2 وينفذ هذه التعليمات.

يستطيع الـــ PIC16C57 أن ينفذ برنامجه الداخلي بمعدل (5) مليون تعليمة آلة في الثانية. ولكن كل تعليمة PBASIC2 تأخذ عدة تعليمات آلة، لذلك فإنَّ PBASIC2 يُنفذ ببطء أكثر، حوالي (3000) إلى (4000) تعليمة في الثانية.



الشكل (5.K): الدارة الكاملة لـ BASIC Stamp.

يملك الـــ BSII (16) رجل دخل/خرج (P0-P15) وتستخدم هذه الأرجل من قبل البرنامج. يمكن وصل هذه الأرجل مع دارات منطقية تغذى من (+5 V) من عوائل TTL أو CMOS (وتملك هذه الأرجل مواصفات فنيَّة تشبه مواصفات سلسلة 74HCT المنطقيّة). يتحدد اتجاه الرجل (دخل أو خرج) خلال البرمجة، وعند تخصيص أو اعتبار رجل ما كرجل خرج فإن الـــ BSII يرسل إشارة عبر هذه الرجل إلى أجهزة خارجية مثل الديودات المصدرة للضوء LEDs، أو محركات السيرفو وغيرها. وعند اعتبار رجل كرجل دخل فإن الـــ BSII يستقبل إشارات عبرها من أجهزة خارجيَّة كالمفاتيح، والحساسات الضوئية، وغيرها. يمكن لكل واحدة من أرجل الدخل/خرج أن تصدر 20 mA وأن تمتص 25 mA.

يمكن للأرجل (P_0 - P_7) و(P_8 - P_{15})، كمجموعات، أن تصدر تياراً قدرة (40 mA) وأن تمتص تياراً (50 mA).

ذاكرة 2048-Byte EEPROM

إن الذاكرة الداخلية للمتحكم الصغري PIC المستخدم في الـ BSII هي ذاكرة OTP-EPROM (ذاكرة قراءة فقط قابلة للبرمجة مرة واحدة) وتبرمج هذه الذاكرة ببرنامجها الدائم في المصنع ويتكون هذا البرنامج من تعليمات تحول الذاكرة إلى مفسِّر PBASIC2 interpreter وبما أن المتحكمات المنطقية PICs الموجودة في الـ Stamp هي عبارة عن مفسرات فإن كامل لغة PBASIC تبرمج بشكل دائم في ذواكر برامجها الداخلية. وهذه الذاكرة لا يمكن استخدامها لتخزين برنامج PBASIC2 ويتم تخزين البرنامج الأساسي في ذاكرة EEPROM (ذاكرة قابلة للبرمجة وقابلة للمسح كهربائياً) وتحتفظ هذه الذاكرة بالمعطيات عند انقطاع التغذية عنها، ويمكن إعادة برمجتها بسهولة. يتم تحميل برنامج PBASIC2 الموجود على حاسوب مضيف إلى ذاكرة EEPROM للـ BSII أثناء التشغيل بدءاً من أعلى عنوان (2047). لا تستخدم أغلب البرامج كامل الذاكرة EEPROM وهذا يعني أن PBASIC2 تسمح لك بتخزين معطيات في الجزء غير المستخدم من الـ EEPROM، وبما أن البرنامج يخزن في الذاكرة من الأعلى إلى الأسفل فإن المعطيات تخزن في الجزء السفلي من الذاكرة بدءاً من أسفل الذاكرة باتجاه الأعلى، وإذا حصل تداخل بين المعطيات والبرنامج الأساسي فإن الـ Stamp يكتشف ذلك ويعطي رسالة خطأ.

دارة Reset (إرجاع)

تتوفر دارة Reset في الـ BSII، فعند وصل التغذية إلى الـ BSII أو عندما ينخفض جهده البطارية إلى ما دون الـ (5 V) يعمل الـ BSII في شروط جهديَّة غير مناسبة قد تؤدي إلى عمل خاطئ، ولذلك تقوم دارة (Reset) ضمنية بإجبار الـ PIC بالعودة (الرجوع) إلى بداية البرنامج والانتظار هناك حتى يصبح جهد التغذية ضمن الحدود المقبولة.

التغذية بالقدرة Power Supply (التزود بالقدرة)

يستخدم منظم جهد (5 V) للتأكد من أن جهد التغذية للـ BSII منظم.

يمكن تطبيق جهد يتراوح بين (5 V) و(15 V) على دخل المنظم، ويُنظم الجهد على (5 V) ويُعطي هذا المنظم تياراً يصل إلى 50 mA. يتوفر الجهد المنظم 5 V على الخرج V_{DD}، ويمكن استخدامه أيضاً لتغذية داراتك الخارجية بشرط أن لا يزيد تيارها عن (50 mA).

وصل BSII إلى حاسوب PC مضيف

يوصل الـ BSII مع حاسوب مضيف، وعلى الحاسوب يتم تشغيل برنامج يسمح لك بالكتابة، والتحرير (edit) والتحميل (download) وكشف أخطاء برنامج PBASIC2. يوصل الـ BSII مع المنفذ التسلسلي للحاسوب RS232(COM port) ويوصل المنفذ التسلسلي مع S_{IN}، S_{OUT} وATN للـ BSII-IC وهذه الأطراف هي (الدخل التسلسلي S_{IN}، الخرج التسلسلي S_{OUT} و(ATN (attention)). يقوم البرنامج المضيف للـ BSII خلال البرمجة بجذب ATN إلى حالة high لإعادة أو إرجاع الـ PIC ثم يرسل الإشارة إلى الـ PIC عبر S_{IN} ويشير ذلك إلى أن الحاسوب سيقوم بتحميل برنامج جديد. يبين الشكل (5.K) وصل الـ BSII مع المنفذ التسلسلي للحاسوب. ويسمح هذا الوصل للحاسوب بإرجاع الـ BSII من أجل البرمجة، أو نقل البيانات أو استقبال معطيات كشف الأخطاء من الـ BSII. يستخدم زوج الوصلات الإضافية (الأرجل 6 و7) من المقبس DB9 من أجل السماح للمكونات الناعمة المضيفة BSII بتحديد هوية المنفذ الذي يوصل الـ BSII معه. يستخدم لوح حامل خاص عند برمجة الـ BSII وتوجد على هذا اللوح منطقة لتجميع نماذج دارات (prototyping area) وبرؤوس دخل/خرج وبمقبس للـ BSII وبمرابط للبطارية (9 V) وبموصل RS 232، كما في الشكل (5.K) ويمكن شراء هذا اللوح مع كابل البرمجة كمجموعة أساسية مع الـ BSII.

لغة PBASIC

على الرغم من وجود كلمة BASIC في تسمية الـ BASIC Stamp إلا أنه لا يمكن برمجته بلغات الـ Visual BASIC أو QBASIC لأنه لا يملك سواقة قرص صلب ولا ذاكرة RAM كبيرة، ويبرمج الـ BASIC Stamp فقط بلغة (PBASIC)، وهي لغة مصممة خصيصاً للاستفادة القصوى من إمكانيات الـ BASIC Stamp والـ PBASIC هي هجين من لغة الـ BASIC المألوفة للعديد من الناس ويتوفر إصداران من هذه اللغة PBASIC I للـ BASIC Stamp I وPBASIC II للـ BASIC Stamp II وقد صمم كل إصدار من هذه الإصدارات للاستفادة القصوى من ميزات التجهيزات العتادية التي تعمل عليها، وتسمى لغة هجينة لأنها تحوي عبارات مألوفة في الـ BASIC وأوامر خاصة بها من أجل القيادة الفعالة لأطراف الدخل/خرج (I/O). تعتبر لغة PBASIC سهلة التعلم لأنها تحوي تعليمات بسيطة مثل GOTO، FOR...NEXT، IF...THEN إضافة إلى تعليمات خاصة بالـ Stamp مثل PULSOUT، DEBUG، BUTTON وغيرها. يكتب البرنامج الذي سيتم تحميله على BASIC Stamp 1 أو على BASIC Stamp 2 بواسطة برنامج خاص بكل واحد منها ويعمل هذا البرنامج على حاسوب شخصي وبعد كتابة البرنامج على الحاسوب يوصل الحاسوب مع الـ BSII عبر المنفذ التسلسلي ومع الـ BSI عبر المنفذ التفرعي ويغذى الـ Stamp ثم يُضغط على (ALT-R) ضمن محرر البرنامج لتحميل البرنامج إلى الـ Stamp، وحالما يتم تحميل البرنامج بنجاح يبدأ تنفيذ البرنامج من السطر الأول في الشيفرة. إن حجم البرنامج الذي يمكن تحميله في الـ Stamp محدود، وتخصص (256) بايتاً للبرنامج في الـ BSI وهي كافية لحوالي (80) إلى (100) سطر من برنامج PBASIC، أما في BSII فتخصص للبرنامج 2048 بايتاً وهي كافية لـ (500) إلى (600) سطر من برنامج PBASIC. لا يمكن توسيع ذاكرة البرنامج لأن شريحة المفسِّر (interpreter chip) للـ PIC تقبل ذواكر محددة وذات سعة ثابتة. أما ذاكرة المعطيات فيمكن توسيعها حيث يمكن وصل EEPROMs أو ذواكر أخرى إلى أرجل الدخل/خرج لزيادة السعة التخزينية للمعطيات. يحتاج ذلك إلى إضافة جزء خاص في برنامج الـ PBASIC من أجل التخاطب بين الـ Stamp والذاكرة الخارجية.

تستخدم ذاكرة معطيات إضافية في تطبيقات الـ Stamp التي تراقب وتسجل معطيات (كما في الأجهزة التي تقيس بعض الأمور البيئية).

تنقيح الأخطاء Debugging

يتوفر محرر Basic Stamp بميزتين هامتين جداً، من أجل تنقيح أخطاء برامج PBASIC، والميزتان هما الاختبار القواعدي (Syntax Checking) وأوامر التنقيح (DEBUG Commands)، فخاصية الاختبار القواعدي تحذرك إلى أي خطأ قواعدي وتكون هذه الميزة متوفرة مباشرة حال تحميلك للبرنامج، وعند وجود أي خطأ قواعدي تخفق عملية التحميل ويظهر لك المحرر رسالة خطأ مبينة الخطأ في شيفرة المصدر (source code). أما أمر التنقيح (DEBUG Command) فهو عبارة عن تعليمة تكتب في البرنامج من أجل إيجاد الأخطاء المنطقية (Logical errors) ـــ الأخطاء التي لم يتمكن Stamp من إيجادها، والتي لم يقصدها المصمم. يعمل أمر DEBUG بشكلٍ مماثل لأمر PRINT في لغة الـ BASIC ويمكن استخدامه لطباعة الوضع الحالي (Current Status) لمتحول محدَّد ضمن برنامج PBASIC كما سينفذ في الـ BASIC Stamp. إذا كانت شيفرة برنامج PBASIC تحوي أمر DEBUG فإن المحرر (editor) يفتح نافذة خاصة في نهاية عملية التحميل ويظهر لك النتيجة.

نظرة إلى لغة البرمجة PBASIC II

تتضمن لغة PBASIC II مثل باقي اللغات عالية المستوى تعريف الثوابت (Constants) واستخدام لافتات العناوين (address labels)، وعمليات حسابية وثنائية وتعليمات متعددة (مثل التفريع، والحلقات والتعامل مع الأعداد، المداخل والمخارج الرقمية، المنافذ التسلسلية، المداخل والمخارج التشابهية، الصوت، الولوج إلى ذاكرة EEPROM والتوقيت، والتحكم بالطاقة وغيرها)، وفيما يلي استعراض سريع لبعض عناصر لغة البرمجة PBASIC II.

(التعليقات) COMMENTS

يمكن إضافة التعليقات ضمن البرنامج لشرح الشيء الذي تقوم به ويبدأ التعليق بفاصلة "," ويستمر حتى نهاية السطر.

(المتحولات) VARIABLES

وهي مواضع في الذاكرة يمكن لبرنامجك أن يستخدمها من أجل تخزين واستعادة الأعداد. وللمتحولات مدى محدد، ويجب الإعلان عن المتحول قبل استخدامه في لغة PBASIC II، والطريقة الشائعة للإعلان عن المتحول هي استخدام VAR:

```
Symbol Var      Size
```

والرمز Symbol يمكن أن يكون أي اسم يبدأ بأحرف (حرف على الأقل) ويمكن أن يحوي الرمز بعد الحرف الأول أحرفاً وأرقاماً ومحارف خط سفلي (9underscore)، ويجب أن يكون الرمز مختلفاً عن الكلمات المفتاحية للغة PBASIC II وعن اللافتات المستخدمة في البرنامج.

أما الحجم (Size) فإنه يحدد عدد الخانات التخزينية التي يتكون منها المتحول. وتوفر لغة PBASIC II أربعة حجوم للمتحولات هي (1 bit)، (4-bit) و(8-bit) و(16-bit) وفيما يلي بعض الأمثلة عن التصريح عن المتحولات.

```
, Declare Variables
Sense-inVar bit , value can be 0 or 1.
Speed    var nib , value in range 0 to 15.
Length   var byte , value in range 0 to 255.
n        var word , value in range 0 to 65535.
```

الثوابت

الثوابت هي قيم غير متغيرة تخصص في بداية البرنامج، ويمكن تعريف الثوابت باستخدام التوجيه CON:

```
beeps   Con     5        , number of beeps
```

وفي الحالة الافتراضية تعتبر PBASIC II أن كافة الأعداد هي في النظام العشري (الأساس 10) ويمكن استخدام أعداد ثنائية وأعداد ستة عشرية فعندما توضع اللاحقة "%" قبل رقم ثنائي مثل (01110111 %) فإن هذا الرقم يعالج كرقم ثنائي، وليس كرقم عشري وتستخدم اللاحقة "$" لتعريف الأعداد الستة عشرية. تقوم لغة PBASIC II بتحويل النص الموضوع بين إشارتي اقتباس إلى شيفرة ASCII الموافقة له فمثلاً يُفَسَّر "A" كشيفرة ASCII للحرف A وهي (65).

لافتات العنوان

يستخدم المحرر لافتات العنوان للإشارة إلى عناوين ضمن البرنامج ويختلف الوضع هنا عن بعض إصدارات لغة BASIC التي تستخدم أرقاماً للأسطر. يمكن أن تكون لافتة العنوان مكونة من أحرف وأرقام ومحارف خط سفلي، ولكن لا يسمح أن يكون المحرف الأول في لافتة العنوان رقماً، ويجب أن لا يكون للافتة العنوان تسمية مطابقة لإحدى الكلمات المفتاحية كالتعليمات الأساسية المستخدمة في اللغة PBASIC أو تسمية مطابقة لأحد المتحولات، ويمكن إجبار البرنامج على الذهاب إلى لافتة العنوان ويتبع التعليمات الموجودة هناك.

وتوضع بعد لافتة العنوان نقطتان متعامدتان (:) (وكمثال على ذلك :Loop).

العوامل الرياضية

تستخدم لغة PBASIC II نوعين من المعاملات هي المعاملات الأحادية (unary) والمعاملات الثنائية (binary). تأخذ المعاملات الأحادية أفضلية على المعاملات الثنائية، أي أن المعاملات الأحادية هي التي تُنجَز أولاً فمثلاً في العبارة 10- SQR16، تقوم لغة PBASIC II أولاً بإيجاد جذر العدد (16) وتطرح الناتج من العدد (10).

العوامل الاحادية

ABS: يعيد القيمة المطلقة

SQR: يعيد الجذر التربيعي

DCD: كاشف قوة 2^n

NCD: كاشف أفضلية لقيمة 16-bit

SIN: تعيد جيب المتمم الثنائي

COS: تعيد تجيب المتمم الثنائي

العوامل الثنائية

+	جمع
-	طرح
/	قسمة
//	باقي القسمة
*	ضرب
**	الـــ 16-bit العليا من الضرب
*/	ضرب 8-bit كلياً و 8-bit جزئياً
MIN	تحدِّد قيمة بقيمة صغرى محدَّدة
MAX	تحدد قيمة بقيمة عظمى محدَّدة
DIG	تعيد رقماً محدَّداً من عدد
<<	تزيح الخانات إلى اليسار بمقدار محدَّد
>>	تزيح الخانات إلى اليمين بمقدار محدَّد
REV	تعكس عدداً محدداً من الخانات
&	تنجز عملية ANDعلى البتات المتقابلة من عددين
|	تنجز عملية ORعلى البتات المتقابلة من عددين
&	تنجز عملية XORعلى البتات المتقابلة من عددين

تعليمات PBASIC المستخدمة في ال BASIC Stamp II

التفريع IF condition THEN address label

وتعني إذا (IF) تحقق شرط (Condition)، عندها يذهب البرنامج THEN إلى لافتة عنوان (address label). يتم إذاً تقييم الشرط فإذا كان الشرط محققاً فإن البرنامج يذهب إلى النقطة المعلمة بلافتة العنوان (الشرط يمكن أن يكون =، < > لا يساوي، < أكبر، 1> أصغر من الواحد، =< أكبر أو يساوي، => أصغر أو يساوي).

BRANCH Offset, [address 0, address 1, ... address N]

اذهب إلى العنوان المحدَّد بالإزاحة (إذا كان ضمن المجال).

GOTO addressLabel

اذهب إلى نقطة من البرنامج محدَّدة بلافتة العنوان

GOSUB addressLabel

خزِّن عنوان التعليمة التالية الواردة بعد GOSUB، ثم اذهب إلى النقطة في البرنامج والمحددة بلافتة العنوان.

RETURN

عودة من التكرارية الفرعيَّة.

الحلقات

FOR variable = start to end STEP Step Value} ... NEXT

ويتم هنا توليد حلقة تكرارية تقوم بتنفيذ خطوط البرنامج بين تعليمات FOR وNEXT ويتم أثناء التنفيذ زيادة أو إنقاص قيمة متحول وفقاً لخطوة (StepVal) حتى تصل قيمة المتحول إلى قيمة نهائية (end value).

Numerics

LOOKUP index, [value 0, value 1, ..., value N], result Variable

يبحث عن القيمة المحددة بالدليل ويخزِّن القيمة في متحول. إذا كان الدليل يزيد عن قيمة الدليل الأعظميَّة للبنود الموجودة في القائمة، فإن المتحول لا يتأثر، يمكن وَضع حتى 256 قيمة في القائمة.

LOOK DOWN value, {comparion Op} [value 0 ... value 1 ... value N], result Variable

تقارن قيمة مع قائمة من القيم وفقاً لعلاقة مقارنة محددة ويتم تخزين أول عدد دليلي يحقق المقارنة في متحول يسمى resultValue، وإذا لم يتواجد أي عدد في الدليل (القائمة) يحقق المقارنة فإن المتحول resultValue لا يتغيّر

RANDOM variable

توليد عدد شبه عشوائي باستخدام متحول بطول بايت (أو كلمة) (word) حيث تبعثر خانات المتحول لإنتاج عدد عشوائي.

DIGITAL I/O

INPUT Pin	جعل رجل محددة كرجل دخل
OUTPUT Pin	جعل رجل محددة كرجل خرج
REVERSE Pin	عكس حالة رجل، فإذا كانت رجل دخل تصبح رجل خرج، وإذا كانت رجل خرج تصبح رجل دخل
LOW Pin	يجعل رجل محددة تعطي خرج Low
HIGH Pin	يجعل رجل محددة تعطي خرج HIGH
TOGGLE Pin	يعكس الحالة المنطقية لرجل
PULSIN Pin, State, result Variable	قياس عرض نبضة (وواحدات القياس هي 2 µs)
PULSOUT, Pin, time	إصدار نبضة خرج مؤقتة عن طريق عكس حالة رجل معينة لزمن محدَّد (من مضاعفات الـــ 2 µs).

BUTTON Pin, downstate, delayrate, bytevariable, targetstate, address	يزيل ارتداد مفتاح دخل، وينجز تكراراً آلياً ويفرع إلى عنوان إذا كان المفتاح في حالة موافقة لهدف محدد ودارات المفتاح يمكن أن تكون فعالة في حالة Low (active-low) أو فعالة في حالة high (active-high).
SHIFTIN dpin, Cpin, mode, [result {\bits} {, result {\bits} ....}]	يزيح معطيات الدخل الواردة من جهاز تسلسلي متزامن.
SHIFTOUT dpin, Cpin, mode, [data {\bits} {, data {\bits} ....}]	يزيح معطيات الخرج إلى جهاز تسلسلي متزامن.
COUNT pin, period, variable	يعد عدد الدورات (0-1-0 أو 1-0-1) على رجل محدَّدة خلال دور (والدور هو عدد بالميللي ثانية)، ويسجل العدد في متحول
XOUT mpin, zpin, [house\Key OR Command\Cycles} {, house\Key or Command {\Cycles} ....}]	يولد شيفرات تحكم بخط التغذية X-10.

SERIAL I/O

SERIN rpin {\fpin}, baudmode, {plabe} {timeout, table,} [input Data]

يستقبل إرسالاً تسلسلياً غير متزامن

SEROUT tpin, baudmode, {pace,} [output Data]

يُرسل معطيات تسلسلياً بخطوة بايتية اختياريّة ويتحكم بالتدفق.

ANALOG I/O

PWM pin, duty, cycles

يصدر على الخرج تعديل عرض نبضة سريعاً ويعيد الرجل إلى حالة دخل.

ويمكن استخدام ذلك لإخراج (0-5) فولت باستخدام مقاومة ومكثف.

RCTIME pin, state, result Variable

يقيس زمن شحن/تفريغ دارة RC ويمكن استخدامها لقياسات على مقسمات الجُهد.

SOUND

FREQOUT pin, duration, freq 1 {, freq 2}

يولد نغمة أو نغمتين جيبيتين لفترة محددة.

DTMFOUT pin, {on time, offtime,} {, ton ....}

يولد نغمات مزدوجة، نغمات متعددة التردد (DTMF، مثل نغمات أزرار مفاتيح جهاز الهاتف).

EEPROM ACCESS

DATA

تخزين معطيات في الـــ EEPROM قبل تحميل برنامج PBASIC.

READ Location, Variable

يقرأ موقع EEPROM ويُخزن القيمة في متحوِّل.

WRITE address, byte

يكتب بايتاً من المعطيات إلى الـ EEPROM في موقع محدَّد.

TIME

PAUSE milliseconds

يوقف البرنامج فترة من الزمن (لا يفعل شيئاً) وتعطى فترة التوقف بالميللي ثانية. تتراوح فترة التوقف بين (0) و65535 ms.

POWER CONTROL

NAP period

يدخل في نمط نوم (sleep) لفترة قصيرة، وينخفض خلالها استهلاك الطاقة إلى 50 μA، وذلك بفرض عدم قيادة أحمال في هذه الفترة. تستمر فترة النوم $18\ ms \times (2^{period})$.

SLEEP seconds

ينام فترة زمنية تتراوح بين (1) و(s) 65535 ثانية من أجل تخفيض استهلاك الطاقة إلى 50 μA.

PROGRAM DEBUGGING

DEBUG output Data {, output Data ......}

يظهر متحولات ورسائل على شاشة حاسوب (PC) ضمن البرنامج المضيف BSII. تتكون معطيات الخرج من واحد أو أكثر من الأمور التالية: سلاسل نصيَّة (text strings)، متحولات، ثوابت، عبارات، محارف تحكم، ومعدل تهيئة (formatting modifier).

تكوين Robot باستخدام BASIC Stamp II

سنبين الآن مدى سهولة تكوين جهاز مثير باستخدام BASIC Stamp II (BS II)، وهذا الجهاز المثير هو الـ robot والغرض الأساسي هنا هو منع الروبوت من الاصطدام بالأجسام. يتحرك الروبوت وعندما يصبح قريباً من جسم ما من اليسار مثلاً، يتوقف ويعود إلى الخلف بالاتجاه المعاكس. في هذا المثال سوف تستخدم BS II كدماغ للروبوت وسوف تستخدم محركي سيرفو موصولين مع دواليب لتعمل كأرجل للروبوت. يستخدم زوج من مرسِلات ومستقبلات الأشعة تحت الحمراء وتعمل هذه الأدوات كأعين للروبوت، كما سوف نستخدم مصوِّتاً كهروضغطياً لإصدار الصوت.

يبيِّن الشكل (6.K) الروبوت بالكامل مع مجموعة مكوناته وعناصر مختلفة.

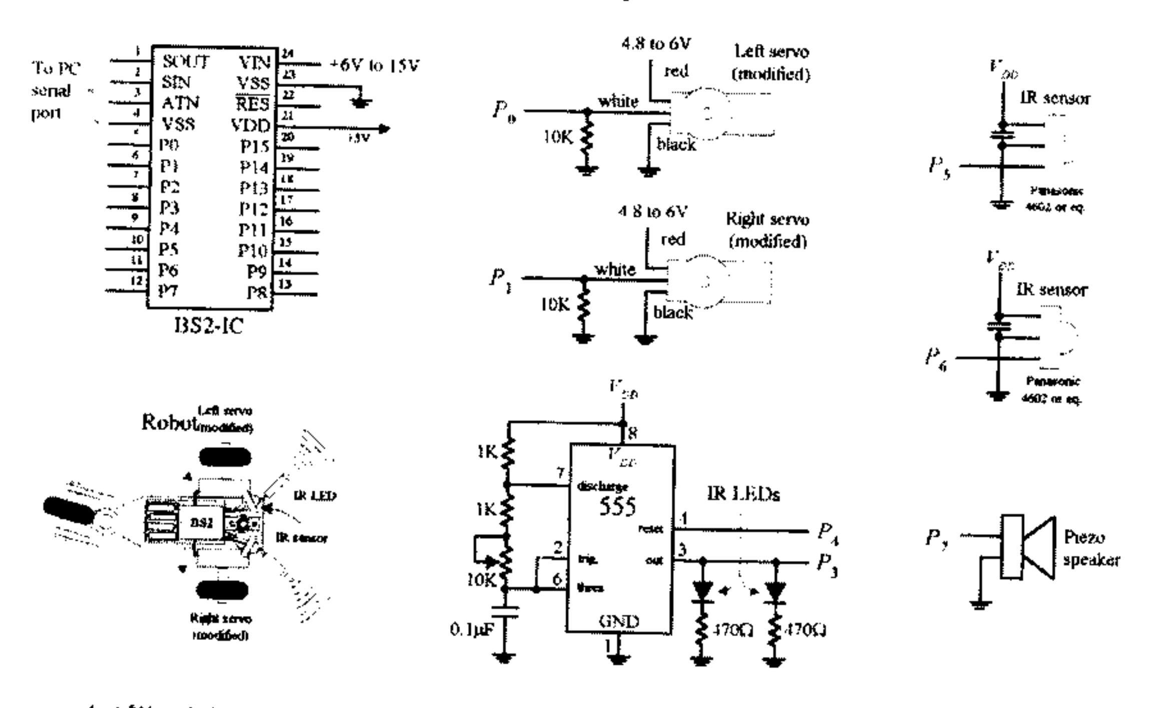
محركات السيرفو

يتم التحكم بالحركة الاتجاهية للروبوت بواسطة محركات سيرفو (يميني ويساري) وقد تم تعديل هذه المحركات لتحقيق دوران كامل (360°)، وقد تمت مناقشة تعديل السيرفو في الفصل الثالث عشر. يجب توليد نبضات بعرض يتراوح من (1000 μs) إلى (2000 μs) وبفواصل تتراوح بين (10) و(20 mS) من أجل التحكم بمحركات السيرفو. عندما يكون عرض النبضة المرسلة إلى محرك السيرفو مساوياً (1500 μs) تتم مركزة المحرك ــ أي أنه لا يدور. أما إذا كان عرض النبضة (1300 μs) فإن المحرك يدور باتجاه عقارب الساعة، أما إذا كان عرض النبضة (1700 μs) فإن المحرك يدور بعكس عقارب الساعة. يتم توليد نبضات التحكم المستخدمة لقيادة أحد محركات السيرفو بواسطة الـ BS II باستخدام تعليمات PULSOUT pin, time 1, والـ PAUSE time 2. الرجل (Pin) هي الرجل التي توصل مع خط التحكم في محرك السيرفو، أما الـ (time 1) فتمثل المدة

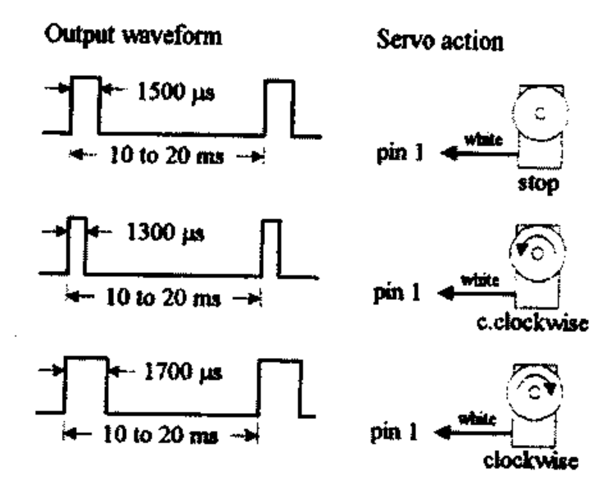
الزمنيّة التي تبقى فيها الرجل في حالة (high). في تعليمة PULSOUT يدل الرقم العشري الذي يوضع مكان (time 1) على نصف الزمن، مقدراً بالميكرو ثانية (μs)، وخلال هذا الزمن تكون الرجل (Pin) في حالة (high).

وعلى سبيل المثال تعني التعليمة PULSOUT 1, 1000 بأن الـ BS II سوف يضع الرجل (1) في حالة (high) لمدة (2000 μs).

في تعليمة PAUSE يمثل العدد الذي يوضع مكان (time 2) فترة استراحة النبضة مقدراً بالـ ms، فمثلاً تعني PAUSE 20 أن فترة استراحة النبضة هي (20 ms). يبيّن الشكل (7.K) شيفرة برنامج BS II المستخدمة لتوليد النبضات.



الشكل (6.K): العناصر والتوصيلات المستخدمة لتكوين روبوت يتجنب الاصطدام بالأشياء.



الشكل (7.K): أشكال النبضات.

مرسلات ومستقبلات الأشعة تحت الحمراء

إن نظام كشف الأجسام المستخدم في الروبوت يتكون من مودولات مرسلات ومستقبلات أشعة تحت حمراء للطرف اليميني وللطرف اليساري حيث يستخدم ديود مصدر للأشعة تحت الحمراء LED كمرسل، ويتم تحفيز الديودات المصدرة للأشعة تحت الحمراء لإصدار الأشعة بواسطة دارة (555) تعمل على تردد 38 kHz وبدورة مشغولية (50 %).

وقد تم استخدام هذا التردد لتجنب التداخل مع أجهزة الأشعة تحت الحمراء المستخدمة للتحكم بالتجهيزات المنزلية، وبشكل خاص الأشعة التي تصدر عن المصابيح الساطعة (يمكن استخدام أنواع أخرى عديدة من مرسلات ومستقبلات الأشعة تحت الحمراء في مثال الروبوت ويمكن أن تُشغل هذه المرسلات والمستقبلات على ترددات أخرى غير المذكورة هنا). تنعكس فوتونات الأشعة تحت الحمراء IR الصادرة عن LED عند اصطدامها بجسم واقع في مسار الروبوت فتلتقطها دارة استقبال الأشعة تحت الحمراء وعند ذلك تنتقل رجل الـــ BS II الموصولة مع مودول استقبال الأشعة تحت الحمراء إلى حالة Low (يستطيع الـــ BS II تنفيذ حوالي 4000 تعليمة في الثانية، أما عدد النبضات التي يولدها مودول الكاشف فهي 38000 وبالتالي فإن عدد النبضات التي يستقبلها الـــ BS II أقل من عدد النبضات المتولدة بحوالي (10) إلى (20) مرة.

المصوات الكهروضغطي

يوصل المصوات الكهروضغطي إلى أحد أطراف الدخل/خرج (I/O) للـــ BS II، ويستخدم لتوليد أصوات مختلفة عندما يتحرك الروبوت إلى الأمام والخلف ويتم تزويد المصوات الكهروضغطي بالإشارات الجيبيَّة اللازمة لتوليد الصوت باستخدام التعليمة:

```
FREQOUT Pin, time, frequency
```

والتعليمة:

```
FREQOUT 7, 1000, 440
```

تخلق موجة جيبيَّة على الرجل (7) بتردد 440 Hz ولمدة 1000 ms.

البرنامج

نبيِّن فيما يلي البرنامج المستخدم للتحكم بالروبوت. كُتب البرنامج باستخدام PBASIC 2 وتم تحميله إلى الـــ BS II.

```
'program for object-avoiding robot
'Define variables and constans
'-----------------------------------------------------------------------------
n            var word     'n acts as a variable that changes.
right_IR     var in5      'Sets pin 5 as an input for right IR detector.
left_IR      var in6      'Sets pin 5 as an input for left IR detector.
right_servo  con 0        'Assigns 0 which will be used to identify right servo.
left_servo   con 1        'Assigns 1 to identify left servo.
IR_out       con 3        'Assigns 3 to identify IR output.
delay        con 10       'A constant that we be used in program.
speed        con 100      'Used to set servo speed.
turn_speed   con 50       'Used to set turn speed of robot
'Main program
'-----------------------------------------------------------------------------
high IR_out                                  'Sets pin 6 "high".
pasuse 50                                    'Pauses for 50 milliseconds.
sense:                                       'Label used to specify IR-sense routine.
if left_IR = 0 and right_IR = 0 then backup  'Object in path, jump to back_up
                                             routine.
if left_IR = 0 then turn_right               'Object on left side, jump to
                                              turn_right routine.
```

```
if right_IR = 0 then turn_left              'Object on right, jump to "turn_left"
                                            routine.
'Second Routines
'-----------------------------------------------------------------------------
forward_sound:                              'Label
freqout 7,1000, 440                         'Generate 1000ms, 440 Hz tone on pin 7
back_sound:                                 'Label
freqout 7, 1000, 880                        'Generate 1000ms, 880 Hz tone on pin 7
'Motion routines
'-----------------------------------------------------------------------------
forward:                 'Label used to specify forward routine.
gosub forward_sound      'Tells program to jump to forward sound subroutine.
debug "forward"          'Tells stamp to display the word "forward" on debug window.
pause 50                 'Pause for 50ms.
for n = 1 to delay*2     'For...Next loop that starts x = 1 and repeats until x = 20.
pulsout left_servo, 750-speed     'Make left servo spin to make robot move forward.
pulsout right_servo, 750+speed    'Make right servo spin to make robot move forward.
pause 20                 'Pause for 20ms, path of servo controlr.
next                     'End of For...Next loop.
goto sense               'Once forward routine is finished go back to sense routine.
backup:                  'Label used to specify back_up routine.
gosub backup_sound       'Tells program to jump back_up sound subroutine.
debug "backward"         'Display "backward" on the debug window.
pause 50                 'Pause for 50ms to ensure.
for n = 1 to delay*3     'For...Next loop that starts x = 1 and repeats until x = 60.
pulsout left_servo, 750+speed     'Makes left servo spin to make robot move backward.
pulsout right_servo, 700-speed    'Make right servo spin to make robot move backward.
pause 20                 'Pause for 20ms, part of servo control.
next                     'End of For...Next loop.
turn_left:               'Label used to specify turn-left routine.
debug "left"             'Display "left" on the debug window.
pause 50                 'Pause for 50ms.
for X = 1 to delay*1     'For...Next loop that starts x = 1 and repeats until x = 10.
pulsout left_servo, 750-turn_speed        'Makes left servo spin to make robot turn
                                          left.
pulsout right_servo, 700-tirn_speed       'Makes right servo spin to make robot spin
                                          left.
pause 20                 'Pause for 20ms, part of servo control.
next                     'End of For...Next loop.
goto sense               'Once left_turn routine is finished, jump back to sense.
turn_right:              'Label used to specify turn-right routine.
debug "left"             'Display "right" on the debug window.
pause 50                 'Pause for 50ms.
for X = 1 to delay*1     'For...Next loop that starts x = 1 and repeats until x = 10.
pulsout left_servo, 750+turn_speed        'Makes left servo spin to make robot turn
                                          right.
pulsout right_servo, 750+tirn_speed       'Makes right servo spin to make robot spin
                                          right.
pause 20                 'Pause for 20ms, part of servo control.
next                     'End of For...Next loop.
goto sense               'Once left_turn routine is finished, jump back to sense.
```

الدارة المتكاملة BS I-I

يبيِّن الشكل (8.K) الـ BASIC Stamp I (BS I) المذكور سابقاً وهذا العنصر (الأداة) هو النموذج الذي سبق BS II، ولكنه ما يزال مستخدماً حتى الآن، ويمتلك الـ BS I الكثير من المواصفات المتوفرة في الـ BS II وله فقط ثماني أرجل (I/O)، مقارنة مع (16) رجل دخل خرج موجودة في الـ BS II ويستخدم فيه المتحكم PIC16C56 بدلاً من PIC1657 المستخدم في الـ BS II، كما أنه يستخدم لغة البرمجة PBASIC I، في حين تستخدم لغة البرمجة PBASIC 2 في الـ BS II. يوصل الـ BS I مع الحاسوب عبر المنفذ التفرعي للحاسوب (أما BS II فيوصل عبر المنفذ التسلسلي)، وكذلك فإن مجموعة تعليماته أقل من مجموعة تعليمات BS II وعمله أقل سرعة ولا يمتلك الكثير من المتحولات لذاكرة RAM.

أشياء لازمة للانطلاق بالـ BASIC Stamp

وتتضمن هذه الأشياء المكونات الناعمة اللازمة للبرمجة، وكابل البرمجة ودليل الاستخدام، وموديول الـ BASIC Stamp، ولوحة حاملة مناسبة (اختيارية). إذا كنت مهتماً باستخدام Stamp محدَّد، إما BASIC Stamp I أو BASIC Stamp II فإنه يترتب عليك شراء مجموعة الأدوات اللازمة للانطلاق بالعمل (Start up Kit) وتتضمن هذه المجموعة البنود الخمسة المذكورة بسعر مخفض أرخص من شراء كل واحد على انفراد، أما إذا كنت تنوي استخدام Basic Stamp I, II فإنه يفضل شراء رزمة البرمجة BASIC Stamp والتي تتضمن (دليل الاستخدام، والبرنامج والكابل لكلا إصداري الـ Stamp). وبعد ذلك عليك شراء مودولات الـ BASIC Stamp وألواح الحوامل (Carrier boards) بشكل منفصل.

تعلّم المزيد عن الـ BASIC Stamp

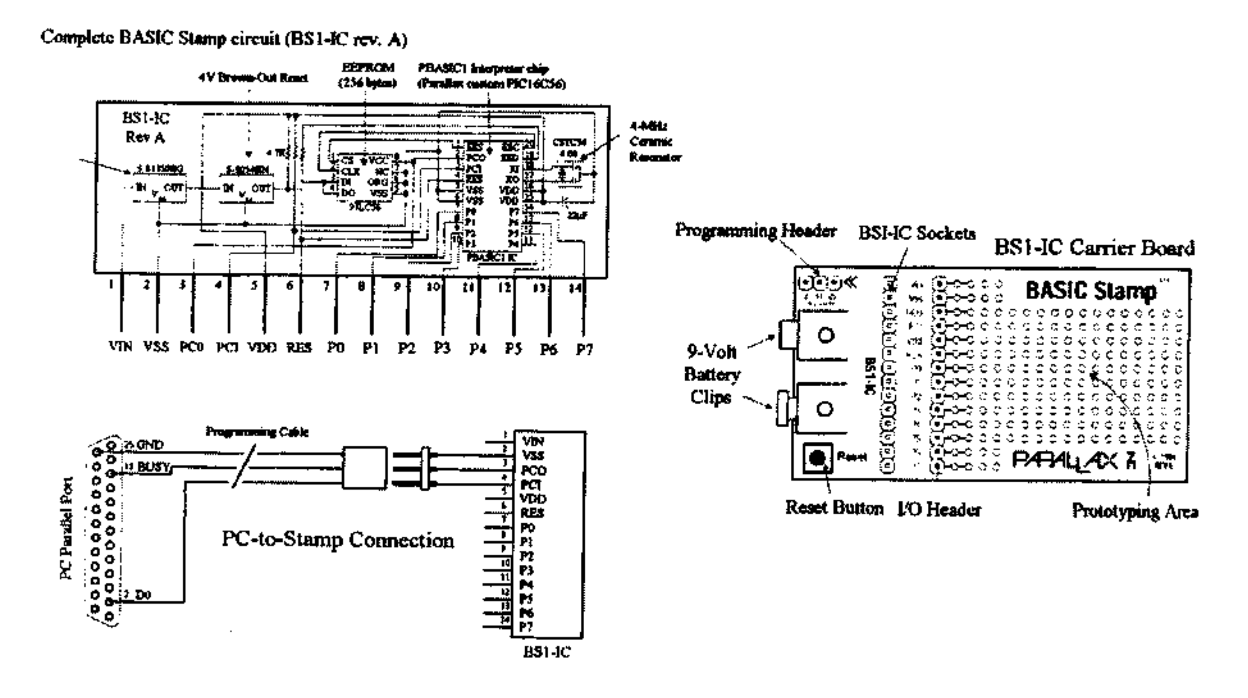
من الضروري قراءة دليل الاستخدام للتعرف على التفاصيل الدقيقة اللازمة لبرمجة الـ BASIC Stamp وفهم هذه التفاصيل، مع أن قراءة دليل الاستخدام قد لا تكون الاستراتيجية المثالية للتعلم وستواجه خلال قراءة هذا الدليل الكثير من المصطلحات التقنية التي قد تكون غريبة عليك، لاسيما إذا كنت مبتدئاً في التعامل مع مثل هذه الأمور. إذا كنت مبتدئاً ننصحك بزيارة الموقع التالي على شبكة الانترنيت (www.stampsinclass.com) حيث تجد فيه سلسلة من الأمور التعليمية مع دليل استخدام الـ Stamp وكل هذه الأمور بإمكانك تحميلها على حاسوب من الموقع، وقد كُتب دليل الاستخدام بلغة إنكليزية سهلة ولا يتطلب فهمه معرفة مسبقة بالمتحكم الصغري (microcontroller) أو بالأمور الإلكترونية اللازمة للتعامل معه ويتوفر كتاب جيد عن الـ BASIC Stamp بعنوان:

Programming and Customizing the Basic Stamp Computer

لمؤلفه Scott Edwards، والكتاب صادر عن دار نشر (MiGraw-Hill). والكتاب موجه للمبتدئين وقراءته سهلة.

التفكير بإنتاج على نطاق واسع

تذكر بأن العناصر الأساسية لدارة الـ BASIC Stamp هي PIC (يحوي CPU وذاكرة ROM لتخزين مفسِّر PBASIC)، وذاكرة EEPROM خارجيَّة (لتخزين البرنامج)، والطنان (resonator). قد يبدو أنه من المفيد التخلص من الذاكرة الخارجيَّة ومن البرنامج المفسِّر (interpreter program) وتحميل برنامج PBASIC المترجم (Compiled PBASIC) مباشرة إلى الـ PIC ـــ لأن ذلك يوفر في الحجم والذاكرة. توجد ميزة في برنامج محرِّر الـ BASIC Stamp وهي برمجة شيفرة الـ PBASIC مباشرة إلى المتحكم الصغري PIC باستخدام المبرمجة Parallax's PIC16Cxx. والفائدة الأساسية من التعامل مع الـ Stamp هي إمكانية ضبط شيفرة البرنامج، واختبار البرامج الكبيرة والتأكد حالاً من أنها تعمل أو لا تعمل ـــ وهذه ميزة هامة جداً عند بناء نموذج تجريبي، أما عند بناء نماذج تجريبيَّة بواسطة PIC فإن عملية اختبار الأخطاء تكون أكثر صعوبة، لأنه يجب ترجمة (Compile) كل شيء في نفس الوقت ـــ ولذلك لا يمكنك اختبار برامج كبيرة.



الشكل (8.K): دارة BASIC Stamp كاملة.

4.2.K متحكمات أخرى جديرة بالاعتبار

توجد الآلاف من المتحكمات الصغرية في الأسواق من إنتاج جهات صانعة مختلفة، وتطرح كل جهة صانعة عدداً من المتحكمات المختلفة، وكل واحد منها مصمم بمواصفات وميزات مختلفة تجعلها مناسبة لتطبيقات مختلفة. وربما تكون أكثر المتحكمات الصغرية استخداماً من قبل الهواة هي متحكمات PIC من إنتاج شركة Microchip.

وهذه المتحكمات تبرمج بسهولة، ورخيصة الكلفة وتتوفر برامج تطوير لاستخدامها. وتوجد أنواع مختلفة من متحكمات CMOS PIC بمواصفات مختلفة. تقدم شركة Microchip المبرمجة PICSTART Plus، وهي عبارة عن مجموعة تطوير تدعم PIC12C5xx، PIC12Cx، وPIC16C5xx، وPIC12C6x، وPIC16C، وPIC17C، وPIC14000، وPIC17C75x وتحوي هذه المبرمجة وحدة تغذية (power supply)، وكابل RS232، ودليل الاستخدام، وPIC16C84 EEPROM ويمكن الإطلاع على مزيد من التفاصيل عن هذه المجموعة من موقع شركة Microchip على شبكة الانترنيت. أهم الشركات الأخرى الصانعة للمتحكمات الصغرية هي شركات Motorola، Mitsubishi، NEC، Phillips، Toshiba، وشركة Texas Instruments وشركة National Semiconductor وشركة Intel، وشركة Zilog، ونذكر فيما يلي بعض أنواع المتحكمات الصغرية الجدية بالاهتمام.

المتحكم 8051 (إنتاج شركة Intel وشركات أخرى)

وهذا المتحكم شائع جداً وهو مصنَّع وفق هيكلية هارفارد المعدلة (حيزات عنوان منفصلة للبرنامج، للذاكرة، ولذاكرة المعطيات) ويتوفر بذاكرة برنامج سعتها 64 K. وهذه الشريحة ذات إمكانيات عالية جداً وسهلة البرمجة، وتتوفر برمجيات تطوير كثيرة لها، ويمكن الحصول على هذه البرمجيات إما بالشراء أو بالمجان ويستخدم المتحكم الصغري 8051 بكثرة في المشاريع التصميميَّة، وخاصة في مجلات الهواة شائعة التداول.

المتحكم 8052 AH-BASIC

وهو شائع الاستخدام من قِبل الهواة، ومشابه للـــ BASIC Stamp ويمتاز بسهولة الاستخدام.

المتحكم 68HCII (موتورولا Motorola)

متحكم 8-bit شائع الاستخدام ويتميَّز بتنوع مكوناته الداخلية مثل EEPROM/OTPROM، RAM، مداخل ومخارج رقميَّة، مبدل A/D، مولد PWM، وقنوات اتصال متزامنة وغير متزامنة.

عائلة COP800 من National Semiconductor

أساس هذه العائلة متحكم (Static 8-bit Microcontroller) يتضمن نظام توقيت، وROM، وRAM، والدارات المنطقية اللازمة للمقاطعة ومداخل ومخارج I/O. أهم خصائص متحكمات هذه السلسلة: دخل/خرج تسلسلي، UART، والعديد من المؤقتات والعدادات 16-bit، ومقاطعة متعددة المصادر، مقارن، مؤقت watchdog، مراقب clock، معدل/مؤقت، مبدل A/D بثماني أقنية، نمط توقف، أرجل دخل خرج عالية التيار، memory-mapped I/O (مداخل/مخارج مخططة ذاكرياً)، بنية هيكلية مخططة ذاكرياً. تعمل متحكمات هذه السلسلة من جهود تغذية تتراوح بين (2.5) و(6 V).

المتحكمات DS5000/DS2250 من إنتاج شركة Dallas Semiconductor

كل ما تحتاجه عند استخدام هذه المتحكمات هو إضافة كريستال أو مكثفين لتحصل على منظومة جاهزة للعمل. هذه الشرائح مزودة بذاكرة RAM غير تطايريَّة.

المتحكم TMS370 من Texas Instruments

وهذا المتحكم مشابه للمتحكم (8051) في أنه يحوي (256) مسجلاً ومراكمات (A) و(B) ومكدساً (Stack) في صفحة المسجل، أما مكوناته المحيطية فتتكون من RAM، ROM (EEPROM، OTP)، ومؤقتين، ومنفذ تسلسلي متزامن (SCI)، SPI (منفذ تسلسلي غير متزامن)، مبدل A/D بثماني خانات وثماني أقنية، ومقاطعات.

5.2.K مجموعات/ ألواح التقييم

تقدم العديد من الشركات مجموعات تقييم مجمَّعة أو لوح (board) تسمح لك عادة باستخدام حاسوب (PC) كنظام تطوير مضيف (host development system) كما هي الحال في Parallax BASIC Stamp ومن بين مجموعات التقييم العديدة نذكر المجموعات التالية

مجموعات التقييم EVS، EVM، EVB، EVBU من Motorola

وهذه المجموعات هي عبارة عن سلسلة واسعة الانتشار من نظم التطوير والتقييم المبنية أساساً على 68HC11 وتورِّد هذه السلاسل مع مرقاب BUFFALO-(monitor)، ومع نماذج متنوعة من برامج التطوير. تستخدم هذه السلسلة بكثرة في الجامعات.

مجموعة 68705 من Motorola

وهي عبارة عن نظام تطوير كامل ـــ يتكون من مكونات ناعمة، مكونات صلبة، محاكٍ Simulator، مقلِّد emulator، دليل استخدام، وغيرها وبسعر لا يتجاوز (100) دولار.

EPU من National Semiconductors

تقدم لك وحدة التقييم والتطوير (evaluation/- COP8780 programming Unit EPU) أداة بسعر لا يتجاوز (125) دولاراً للتعامل مع عائلة متحكمات COP-BASIC 8-bit Microcontrollers. يتكون النظام من لوح EPU، مكونات ناعمة لتنقيح الأخطاء ولتحويل البرامج المكتوبة بلغة عالية المستوى إلى لغة التجميع، مترجم للغة C (C-compiler)، وشيفرة اختبارية (Sample Code)، ووحدة تغذية جدارية (Wall power supply)، إضافة إلى الوثائق وغيرها من الأمور.

جدول المحتويات